

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Markus Kurpjuwait**

**„Entwicklung eines Schlag-  
schutzkonzepts zur Vermei-  
dung von Strukturschäden an  
Faserverbundstrukturen“**

Mittweida, 2017



# **BACHELORARBEIT**

---

## **„Entwicklung eines Schlag- schutzkonzepts zur Vermei- dung von Strukturschäden an Faserverbundstrukturen“**

Autor:

**Herr**

**Markus Kurpjuwait**

Studiengang:

**Maschinenbau**

Seminargruppe:

**MB12wF-B**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Frank Weidermann**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Ing. Christoph Albani**

Einreichung:

**Mittweida, 30.06.2017**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2017**

# **BACHELOR THESIS**

---

## **“Development of a concept for impact protection to avoid structural damage to fiber composite structures”**

author:

**Mr.**

**Markus Kurpjuwait**

course of studies:

**Mechanical engineering**

seminar group:

**MB12wF-B**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Frank Weidemann**

second examiner:

**Dipl.-Ing. Christoph Albani**

submission:

**Mittweida, 30.06.2017**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2017**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Kurpjuwait, Markus:

Entwicklung eines Schlagschutzkonzepts zur Vermeidung von Strukturschäden an Faserverbundstrukturen. - 2017. - 10, 69, 15 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2017

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit befasst sich damit, Möglichkeiten zu finden, Faserverbundstrukturen gegen Schlagschäden zu schützen. Hierbei wurde auf mögliche Versagensarten eingegangen und bestehende Möglichkeiten, die entsprechenden Versagensarten zu verhindern. Nach einer Vorauswahl an Schlagschutzkonzepten wurden mit diesen Voruntersuchungen durchgeführt, um die Vorauswahl hinsichtlich ihrer Eignung weiter einzuschränken. Die endgültige Auswahl der Schlagschutzkonzepte wurde durch einen Impact-Test an CFK-Proben untersucht und durch Mikroskopie-Aufnahmen und Ultraschallprüfungen ausgewertet. Die Ergebnisse der Untersuchungen dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen, um die getesteten Methoden weiter zu optimieren.



# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 FVK-Werkstoffe .....	3
2.1.1 Faser-Werkstoffe .....	3
2.1.2 Matrixwerkstoffe .....	5
2.2 Energieaufnahme von FVK-Werkstoffen .....	6
2.2.1 Impactorgeschwindigkeit .....	6
2.2.2 Fehlerarten .....	7
2.2.3 Impactor-Geometrie .....	9
2.3 Bestimmung Faservolumengehalt .....	10
2.4 Bestimmung des Fehlergehalts .....	12
2.5 Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit .....	13
2.6 Ultraschallprüfung zur Bestimmung der Schadflächen .....	14
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>17</b>
3.1 Herstellungsverfahren von FVK .....	17
3.2 Möglichkeiten zur Verbesserung der Impacteigenschaften .....	19
3.2.1 Modifikation der Matrix .....	19
3.2.2 Interlaminare Zwischenschichten .....	20
3.2.3 Verstärkung der Fasern .....	22
<b>4 Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>23</b>
<b>5 Voruntersuchungen .....</b>	<b>25</b>
5.1 Auswahl der zu untersuchenden Schlagschutzarten .....	25
5.2 Definition und Herstellung der Vorversuchs-Probekörper .....	26

5.3	<i>Bestimmung der Probenqualität</i> .....	29
5.3.1	Bestimmung des Fehlergehalts .....	29
5.3.2	Ermittelte Faservolumengehalte .....	30
5.4	<i>Ergebnisse ILS-Test</i> .....	31
5.5	<i>Weitere Beobachtungen</i> .....	33
5.6	<i>Diskussion der Vorversuchsergebnisse</i> .....	34
5.7	<i>Auswahl der Schlagschutzkonzepte für den Impacttest</i> .....	37
<b>6</b>	<b>Versuchsdefinition des Impacttests</b> .....	<b>39</b>
6.1	<i>Impactvorrichtung</i> .....	39
6.1.1	Auswahl der Impactor-Geometrie .....	39
6.1.2	Entwicklung der Probenaufnahme .....	40
6.2	<i>Versuchsdurchführung</i> .....	42
6.2.1	Vorbereitung der Impactversuche .....	42
6.2.1.1	Bestimmung der Impactenergie und der Fallhöhe .....	42
6.2.1.2	Definition und Herstellung der Impact-Probekörper .....	44
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung</b> .....	<b>45</b>
7.1	<i>Bestimmung der Impactprobenqualität</i> .....	45
7.1.1	Ermittelter Fehlergehalt .....	45
7.1.2	Ermittelte Faservolumengehalte .....	46
7.2	<i>Äußere Schäden nach den Impactversuchen</i> .....	47
7.3	<i>Mikroskopische Analyse</i> .....	49
7.4	<i>Auswertung der Ultraschallaufnahmen</i> .....	50
<b>8</b>	<b>Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse</b> .....	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick</b> .....	<b>63</b>
<b>Literatur</b>	.....	<b>65</b>
<b>Anlagen</b>	.....	<b>69</b>
<b>Anlagen, Datenblatt MGS® RIM 935</b>	.....	<b>A-I</b>
<b>Anlagen, Hostaphan® RNK</b>	.....	<b>A-VII</b>
<b>Anlagen, Datenblatt Kraibon®</b>	.....	<b>A-X</b>
<b>Anlagen, Verarbeitung Kraibon®</b>	.....	<b>A-XI</b>



---

<b>Anlagen, Datenblatt DuoMod® DP5045 .....</b>	<b>A-XII</b>
<b>Anlagen, DuoMod® DP5045 Präsentation .....</b>	<b>A-XIII</b>
<b>Anlagen DuoMod® DP5045 Verarbeitung.....</b>	<b>A-XIV</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fahrzeuggewicht des VW Golf 1 .....	1
Abbildung 2: Ursachen PKW-Gewichtszunahme .....	2
Abbildung 3: Einfluss des Faserdurchmessers auf die Festigkeit .....	3
Abbildung 4: niederdynamischer Impact .....	7
Abbildung 5: Kiefernmuster an dünner Probe und dicker Probe .....	8
Abbildung 6: Delamination Aufgrund von Matrixbrüchen .....	8
Abbildung 7: Einfluss von Impact-Energie und Impactor-Geometrie .....	10
Abbildung 8: Mikroskop-Bild von Fasern .....	11
Abbildung 9: Ermittlung Fehlergehalt mittels Grauwertkorrelation .....	12
Abbildung 10: Mögliche Versagensarten beim ILS-Test .....	13
Abbildung 11: Prüfvorrichtung ILS-Test.....	14
Abbildung 12: Probenmaße ILS-Proben.....	14
Abbildung 13: B-Bild .....	15
Abbildung 14: A- und C-Bild .....	16
Abbildung 15: Omniscan SX und Prüfkopf mit Weggeber .....	16
Abbildung 16: Handlaminieren .....	17
Abbildung 17: Nasspressen .....	18
Abbildung 18: Wirkmechanismen von Partikeln .....	19
Abbildung 19: Gelochte Folie als interlaminare Zwischenschicht .....	20
Abbildung 20: Einsatz von Kraibon® .....	21

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 21: Crashelement ohne Kraibon® und mit Kraibon® .....	21
Abbildung 22: Kevlarhelm .....	22
Abbildung 23: Probenherstellung durch Handlaminieren .....	26
Abbildung 24: Lochmuster der Folien .....	28
Abbildung 25: Test Körnung Sandpapier .....	28
Abbildung 26: Fehlergehalt Vorversuchsproben .....	29
Abbildung 27: Faservolumengehalt Vorversuche .....	30
Abbildung 28: scheinbare interlaminare Scherfestigkeit .....	31
Abbildung 29: Verlauf Kraftkurve ILS-Test (Bsp.: P2R-1) .....	33
Abbildung 30: Ablösung der Deckschichten bei P2N .....	33
Abbildung 31: Schichtdicken nach dem Pressen PET, Kraibon® .....	34
Abbildung 32: Porenbildung Matrix mit DuoMod®-Partikeln .....	35
Abbildung 33: Aufgetretene Versagensarten .....	36
Abbildung 34: Impactvorrichtung und Impactor-Geometrie .....	39
Abbildung 35: Konzept 1 Probenaufnahme .....	41
Abbildung 36: Konzept 2 Probenaufnahme .....	41
Abbildung 37: Polardiagramm mit E-Moduln eines quasiisotropen Laminats .....	44
Abbildung 38: Fehlergehalt Impactproben .....	45
Abbildung 39: EPDM-Schichtdicken E0351 .....	46
Abbildung 40: Faservolumengehalt .....	46
Abbildung 41: Schadflächen Impactseite OS; P4R, DUO; E035 .....	48
Abbildung 42: Schadflächen Zugseite OS; P4R, DUO; E035 .....	48
Abbildung 43: Schäden Zugseite OS, P4R, DUO, E035 .....	49

---

Abbildung 44: : innere Schäden Impactproben OS; P4R; DUO; E035.....	50
Abbildung 45: Ultraschallaufnahme OS1.....	51
Abbildung 46: Ultraschallaufnahme OS2.....	52
Abbildung 47: Ultraschallaufnahme P4R1 .....	52
Abbildung 48: Ultraschallaufnahme P4R3.....	53
Abbildung 49: Ultraschallaufnahme Duo1 .....	53
Abbildung 50: Ultraschallaufnahme Duo3 .....	54
Abbildung 51: Ultraschallaufnahme E0351.....	55
Abbildung 52: Ultraschallaufnahme E0353.....	55

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Kohlenstofffaserklassen.....	5
Tabelle 2: Versuchsplan Vorversuche .....	26
Tabelle 3: Lagenaufbau ILS-Proben.....	27
Tabelle 4: Versuchsplan Impacttest und anschließende Untersuchungen .....	37
Tabelle 5: Lagenaufbau Impactversuche.....	44
Tabelle 6: Maße visuelle sichtbare Schäden .....	47
Tabelle 7: Maße Schadflächen.....	56

# Abkürzungsverzeichnis

<b>A</b>	Fläche
<b>b</b>	Breite
<b>boPET</b>	Biaxial orientiertes Polyethylenterephthalat
<b>bzw</b>	beziehungsweise
<b>CFK</b>	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlenstoffdioxid
<b>d</b>	untere Sieböffnungsweite bei der Größenbestimmung von Gleisschotter
<b>D</b>	obere Sieböffnungsweite bei der Größenbestimmung von Gleisschotter
<b>Duo</b>	Proben mit DuoMod®-Partikeln
<b>E035</b>	Proben mit 0,35mm-Lagen Kraibon®
<b>E05</b>	Proben mit 0,5mm-Lagen Kraibon®
<b>E<sub>damage</sub></b>	Schadenergie bei intermediate velocity Impact
<b>E<sub>Impact</sub></b>	Impactenergie
<b>E-Modul</b>	Elastizitätsmodul
<b>EPDM</b>	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
<b>E<sub>pot</sub></b>	potenzielle Energie
<b>E<sub>SL</sub></b>	durch Struktur absorbierte Energie
<b>E<sub>Stein</sub></b>	Steinschlag-Energie
<b>F</b>	Kraft
<b>FVK</b>	Faserverstärkte Kunststoffe
<b>g</b>	Fallbeschleunigung
<b>GFK</b>	Glasfaserverstärkter Kunststoff
<b>h</b>	Fallhöhe
<b>HM</b>	High Modulus (hochmodul)
<b>h<sub>Probe</sub></b>	Probendicke ILS-Proben

<b>HT</b>	High Tenacity (hochfest)
<b>HVI</b>	high velocity Impact
<b>IM</b>	Intermediate Modulus (Mittelmodul)
<b>I(m-r)</b>	vertikaler Abstand zwischen Mess- und Referenzcursor im Ultraschallbild
<b>ILS</b>	interlaminare Scherfestigkeit (auch ILSS)
<b>IVI</b>	intermediate velocity Impact
<b>L</b>	Länge
<b>LVI</b>	low velocity Impact
<b>m</b>	Masse
<b>m<sub>f</sub></b>	Masse Faserlage
<b>m<sub>Fasern</sub></b>	Gesamtmasse Fasern im Verbund
<b>m<sub>Verbund</sub></b>	Gesamtmasse Faserverbund
<b>m<sub>Stein</sub></b>	Masse Stein
<b>n</b>	Faserlagen-Anzahl
<b>OS</b>	Proben ohne Schlagschutz
<b>P2L</b>	Proben mit 2 Lagen gelochter PET-Folie
<b>P2N</b>	Proben mit 2 Lagen unbehandelter PET-Folie
<b>P2R</b>	Proben mit 2 Lagen angerauter PET-Folie
<b>P4L</b>	Proben mit 4 Lagen gelochter PET-Folie
<b>P4N</b>	Proben mit 4 Lagen unbehandelter PET-Folie
<b>P4R</b>	Proben mit 4 Lagen angerauter PET-Folie
<b>PAN</b>	Polyacrylnitril
<b>PET</b>	Polyethylenterephthalat
<b>P<sub>SS</sub></b>	Insert-Potenzial zur Aufnahme von Normalenspannungen
<b>P<sub>SS</sub><sup>*</sup></b>	P <sub>SS</sub> reduziert durch die Randeinflüsse einer Stuktur
<b>r<sub>Stein</sub></b>	Gesteinsradius
<b>RTM</b>	Resin Transfer Moulding (Harzinjektionsverfahren)
<b>S(m-r)</b>	horizontaler Abstand zwischen Mess- und Referenzcursor im Ultraschallbild

<b>ST</b>	Super Tenacity (superfest)
<b>t<sub>Soll</sub></b>	Solldicke
<b>UD</b>	unidirektional
<b>UHM</b>	Ultra High Modulus (Ultrahochmodul)
<b>V<sub>Stein</sub></b>	Gesteinsvolumen
<b>f</b>	Dichte Fasern
<b>Granit</b>	Dichte Granit
<b>m</b>	Dichte Matrix
<b>EN</b>	Kantenkoeffizient bei Normalbelastung
<b>ψ</b>	Fasermassenanteil
<b>φ</b>	Faservolumenanteil
<b>τ</b>	scheinbare interlaminare Scherfestigkeit



# 1 Einleitung und Motivation

Klimaschutz ist ein immer präsenter werdendes Thema in Deutschland und weltweit. Auch in der Automobil-, Bahn- und Luftfahrtindustrie wird der Klimaschutz immer relevanter und die Anforderungen an die Industrie, die CO<sub>2</sub>-Emission zu senken, steigen kontinuierlich. Dies ist sehr gut am Beispiel der Automobilindustrie zu sehen. In dieser wird stetig nach neuen Möglichkeiten gesucht, den Kraftstoffverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emission zu senken. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei darin, dass Fahrzeuggewicht zu reduzieren und damit einem über Jahre herrschenden Trend entgegenzuwirken. Sehr gut sieht man das am Beispiel VW Golf. Während ein Golf 1980 ungefähr 800kg gewogen hat, beläuft sich das Gewicht bei einem Golf VI aus dem Jahre 2010 auf ein Gewicht von ca. 1200kg, was einem Zuwachs von 50% entspricht. (Abbildung 1) Beim Golf 7 konnte diesem Trend erstmals entgegengewirkt werden, dieser hat ein Fahrzeuggewicht von ca. 1200kg und ist somit nicht schwerer geworden. [20] Bei anderen Fahrzeugen und Fahrzeugherstellern kann dieser Trend in den letzten Jahren ebenso beobachtet werden, bzw. sind bei einigen Fahrzeugen bereits Gewichtsreduktionen zu beobachten. Teile wie Motorträger, Kardanwellen oder Schraubenfedern werden dabei z.B. bereits aus FVK-Werkstoffen gefertigt. [16] S.2

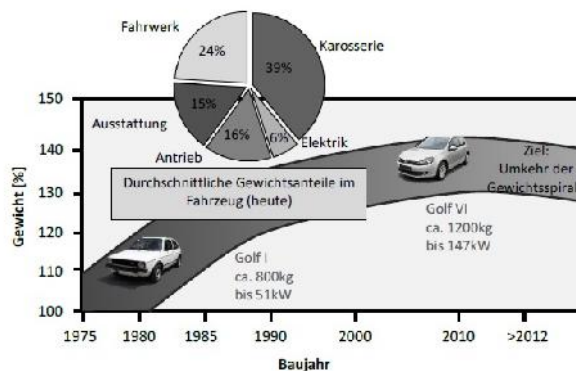


Abbildung 1: Fahrzeuggewicht des VW Golf 1 [6] S.2

Die hauptsächlichen Ursachen dafür sind die gestiegenen Komfort- bzw. Qualitätsansprüche und die steigenden Ansprüche an die Fahrzeugsicherheit. (Abbildung 2)

Darüber hinaus soll im Schiffbau oder bei Schienenfahrzeugen ebenso vermehrt auf Leichtbau gesetzt werden. Von Anbauteilen bis hin zu hochbelasteten Strukturbauteilen, der Anteil von Leichtbauteilen wächst stetig. Beispiele für Bauteile aus FVK sind Aufbauten oder Masten im Schiffsbau und Wagenkästen bei Schienenfahrzeugen. [16] S.2-3



**Abbildung 2: Ursachen PKW-Gewichtszunahme [17] S.6**

Beliebte Leichtbaumaterialien sind dabei Magnesium, Aluminium, Titan und vor allem Faserverbundkunststoffe. [22] Neben der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission profitieren auch die fahrdynamischen Eigenschaften von dem geringeren Fahrzeuggewicht. Die Fahrzeuge können leichter beschleunigen und die Fliehkräfte in der Kurve sowie der Bremsweg werden reduziert. Aufgrund der positiven Einflüsse auf die fahrdynamischen Eigenschaften sind Faserverbundkunststoffe ein, im Renn- und Motorsport, häufig verwendeter Werkstoff. Lediglich der hohe Kostenaufwand verhindert bisher einen flächendeckenden Einsatz im Fahrzeugbau. Faserverbundkunststoffe weisen jedoch im Vergleich zu anderen Leichtbaustoffen einige Vorteile auf. Sie besitzen sehr gute spezifische Eigenschaften, das Energieaufnahmevermögen ist höher und die freie Formgestaltungsmöglichkeit ist ebenso als Vorteil zu betrachten. Außerdem lassen sich die gewünschten Eigenschaften sehr gut über einen gezielten Lagenaufbau einstellen, da vor allem in Faserrichtung hohe Festigkeiten und Steifigkeiten erreicht werden können. Quer zur Faserrichtung sind die Eigenschaften jedoch deutlich schlechter, was, in diesem Fall, zu einem geringeren Belastungsvermögen führt. Schlagbeanspruchungen durch Fremdkörper können zu ungewollten und vor allem nicht einsehbaren Strukturschäden im Inneren des Bauteils führen. Schäden wie Delamination oder Matrixbrüche sind von außen nicht, oder nur schwer, zu erkennen. Eine Möglichkeit Bauteile auf Schäden zu untersuchen, ist die Ultraschallprüfung, die jedoch, vor allem bei großen und komplexen Bauteilen, oft kompliziert und zeitintensiv ist. Die Schäden beeinträchtigen jedoch die Eigenschaften des Bauteils nachhaltig negativ. Ein spröderes Werkstoffverhalten und ein geringeres Lastaufnahmevermögen sind die Folgen. Dies kann im Falle von Strukturbauteilen lebensgefährlich werden. Dabei gilt es Möglichkeiten zu finden, um diesem ungewünschten Werkstoffverhalten entgegenzuwirken und das Impactverhalten zu verbessern. Gängige Schlagschutzarten sind bisher interlaminare Zwischenschichten, die Modifikation der Matrix und das Verarbeiten anderer Faserarten. Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, welchen Einfluss die unterschiedlichen Schlagschutzarten haben und inwiefern sie einen positiven Einfluss auf das Impactverhalten ausüben können.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 FVK-Werkstoffe

Wie bereits erwähnt sind FVK Konstruktionen aus verschiedenen Werkstoffen. [1] S.13 In der Regel bestehen sie aus zwei Komponenten, den Fasern und der Matrix, in der die Fasern eingebettet sind. In diesem Kapitel soll auf die Eigenschaften der beiden Komponenten eingegangen werden, welche Aufgaben sie übernehmen und welche Probleme bestehen.

#### 2.1.1 Faser-Werkstoffe

Die Hauptaufgabe der Fasern ist die Aufnahme der wirkenden Lasten. Dabei sind hohe Steifigkeiten und hohe Festigkeiten von Vorteil. Diese werden vor allem durch die atomare Bindung beeinflusst. Auch die Dichte sollte bei einem Leichtbauwerkstoff möglichst gering sein. Die Faserform weist in der Regel bessere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auf als massivere Formen. (Abbildung 3) Dies hat etwas mit dem sogenannten Größeneffekt zu tun. Statistisch gesehen ist es wahrscheinlicher, dass bei großem Werkstoffvolumen mehr Fehlstellen vorkommen. Der sehr geringe Faserdurchmesser senkt also die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlstellen und das große Gesamtvolumen wird auf mehrere Volumina aufgeteilt.

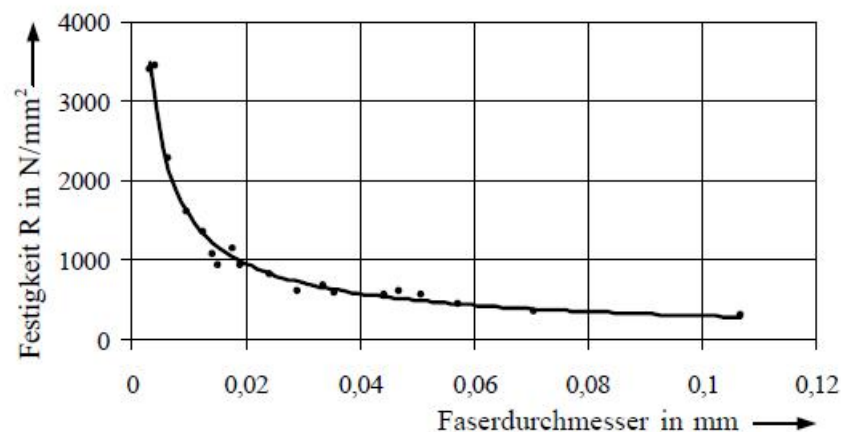


Abbildung 3: Einfluss des Faserdurchmessers auf die Festigkeit[1] S.22

Auch die Größe der Fehlstellen wird damit auf den Faserdurchmesser begrenzt und Faserrisse können nicht ungehindert wandern, sondern sind auf die Faser begrenzt. Im Falle des Faserrisses werden die Lasten von den umliegenden Fasern mitgetragen. Ein weite-

rer Faktor ist die Orientierung der Fasern. Durch die Faserform erfahren die atomaren Bindungen eine starke Orientierung in Faserrichtung. Hohe Steifigkeiten und Festigkeit in Faserrichtung sind die Folge. Die Faserform führt allerdings dazu, dass genau diese Eigenschaften quer zur Faserrichtung stark reduziert sind, weshalb die Fasern ein anisotropes Verhalten aufweisen, was bei Belastungen quer zur Faserrichtung, wie einem Impact, zu einem großen Problem werden kann. [1] S.21-22

Die am meisten eingesetzten Faserwerkstoffe sind Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern. Da in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Kohlestofffasern zum Einsatz kommen, wird auf Glas- und Aramidfasern nicht weiter eingegangen. Um weitere Informationen zu den verschiedenen Fasertypen zu erhalten, wird auf Quelle [1] verwiesen.

Kohlenstofffasern besitzen im Vergleich mit Glasfasern bessere mechanische Eigenschaften. Die Steifigkeit und Festigkeit ist höher als jene von Glasfasern. In elementarer Form kommt Kohlenstoff in der Natur nur als Naturgraphit oder als Diamant vor, welche beide jedoch unschmelzbar und unlöslich sind, weshalb sie nicht zur Herstellung von Kohlenstofffasern geeignet sind und zur Herstellung der Fasern ein aufwendiger Prozess nötig ist. [1] S.35, 39-40

Die Herstellung von Kohlefasern geschieht mit Hilfe von PAN-Fasern. PAN ist ein kostengünstiges Produkt der Textilindustrie. Bei der Herstellung durchlaufen die PAN-Fasern einen bis zu fünfstufigen Prozess. Der erste Schritt ist das Stabilisieren, bei dem die PAN-Fasern in eine unschmelzbare Struktur überführt werden. Dieser Vorgang läuft in einer oxidativen Atmosphäre, bei Temperaturen von 180-350°C ab. Die PAN-Fasern stehen dabei unter Zugspannung. Schritt 2 ist die Carbonisierung. Dieser Prozess findet in einer Stickstoffatmosphäre, bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 600°C/min, Temperaturen bis 1500°C und ohne Spannung statt. Die Graphitisierung ist der dritte Schritt im Herstellungsprozess. Diese läuft bei Temperaturen von 2000-3000°C ab, je nachdem welcher Elastizitätsmodul gewünscht ist. In der anschließenden Oberflächenbehandlung werden stabile Oberflächenoxide erzeugt, welche die Haftung zwischen Kohlenstofffasern und Matrix verbessern. Bei dem fünften Schritt können die Fasern mit einer Schlichte versehen werden, die bei der Weiterverarbeitung die Fasern schützt und die Haftung zwischen Faser und Matrix weiter verbessert. [1] S.36-37

Die starken Bindungen der Graphitkristalle, innerhalb der Schichtebene, führen zu einem hohen Elastizitätsmodul, welcher einen theoretischen Wert von 1.050.000N/mm<sup>2</sup> erreichen kann und eine theoretischen Zugfestigkeit von 100.000N/mm<sup>2</sup>. In der Praxis sind bisher jedoch nur Elastizitätsmodule von 450.000N/mm<sup>2</sup> und Zugfestigkeiten von 7.000N/mm<sup>2</sup> realisierbar.[1]

Im Laufe der Zeit wurden mehrere Kohlenstofffaserklassen entwickelt, welche sich in Festigkeiten und Steifigkeiten unterscheiden. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der verschiedenen Faserklassen dargestellt.

**Tabelle 1 Kohlenstofffaserklassen [1] S.41**

	HT-Faser	ST-Faser	IM-Faser	HM-Faser	UHM-Faser
E-Modul längs $E_{\parallel}$ in $\text{N/mm}^2$	230 000	245 000	294 000	392 000	450 000
E-Modul quer $E_{\perp}$ in $\text{N/mm}^2$	28 000			15 200	
G-Modul $G_{\parallel}$ in $\text{N/mm}^2$	50 000			28 600	
Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\parallel}$	0,23			0,2	
Therm. Ausdehnungskoeff. längs $\alpha_{T\parallel}$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	-0,455			-1,08	
Therm. Ausdehnungskoeff. quer $\alpha_{T\perp}$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	12,5			31	
Zugfestigkeit $R_{f\parallel}^+$ in $\text{N/mm}^2$	3 430	4 510	4 210	2 450	2 150
Dichte $\rho_f$ in $\text{g/cm}^3$	1,74	1,8	1,74	1,81	1,9

In der vorliegenden Arbeit kommen HT-Fasern zum Einsatz. HT-Fasern sind der am häufigsten verwendete Typ, mit einer Zugfestigkeit von  $3430 \text{ N/mm}^2$  und einem Elastizitätsmodul von  $230.000 \text{ N/mm}^2$ . HT steht dabei für high tenacity, also hochfest. Weitere Fasertypen sind IM-Fasern, die sowohl einen höheren Elastizitätsmodul, als auch eine höhere Zugfestigkeit aufweisen, als HT-Fasern und damit die beste Kombination dieser beiden Eigenschaften zeigen. HM- und UHM-Fasern zeichnen sich wiederum durch hohe Elastizitätsmodule bei vergleichsweise geringen Zugfestigkeiten aus. [1] S.41

### 2.1.2 Matrixwerkstoffe

Die Matrix übernimmt im FVK mehrere Aufgaben. Durch sie behalten die Fasern ihre geometrische Anordnung, es werden die Fasern, bzw. die einzelnen Laminatschichten, miteinander verklebt und so kann die Matrix die Kräfte zwischen den Fasern und Schichten leiten und verteilen. Darüber hinaus trägt sie die Belastungen, die quer zur Faserorientierung wirken. Da Fasern unter Druckbeanspruchung zum Ausknicken neigen, unterstützt die Matrix die Fasern und richtet sie aus. Außerdem schützt sie die Fasern vor Umgebungseinflüssen, wie Chemikalien oder Strahlung. Die Bruchdehnung der Matrix muss über jener der Fasern liegen, da bei hohen Beanspruchungen die Matrix vor den Fasern versagt und die möglichen Zugfestigkeiten der Fasern nicht vollständig genutzt werden können. Entsprechend sollte die Bruchdehnung der Matrix mindestens doppelt so hoch sein, wie die der Fasern. Des Weiteren hängen die Eigenschaften, des Werkstoffverbundes, wie Dichte, Steifigkeit, Festigkeit, oder Schlagzähigkeit von dem Matrixwerkstoff ab. Als Matrixsysteme kommen Duroplaste und Thermoplaste zum Einsatz. [1] S.83

Duroplaste sind hierbei die am meisten verwendeten Matrixsysteme in der Faserverbundtechnik. Sie besitzen einen hohen Elastizitätsmodul, was auf die enge Netzstruktur und starke Hauptvalenzbindungen zurückzuführen ist. Weiterhin besitzen sie eine gute thermische, bzw. chemische Beständigkeit und sind Lösungsmittel-unlöslich. Mit steigender Vernetzungsdichte steigt die Steifigkeit und die Matrix ist bei höheren Temperaturen belastbarer. Die Verarbeitung von duroplastischen Matrixsystemen ist unproblematisch, da sie in der Regel niederviskos sind und die Fasern so gut benetzt werden können. Jedoch

lassen sich Duroplaste nicht mehr aufschmelzen und sie weisen, aufgrund der hohen Vernetzung, ein eher sprödes Bruchverhalten auf. Die am meisten eingesetzten Duroplaste sind Epoxid-Harze, Polyester-Harze und Vinylester-Harze. [1] S.84-85

Eine Epoxid-Matrix besteht aus dem Epoxid-Harz und einem Härter, der in definierten Masse-Mengenverhältnissen dem Epoxid-Harz untergemischt wird. Die sogenannten Gebinde besitzen eine Topfzeit, welche die mögliche Verarbeitungsdauer angibt. Bei der Aushärtung vernetzen die Makromoleküle über eine Polyaddition miteinander. [1] S.125 Die Reaktion des Harzes mit dem Härter ist eine exotherme Reaktion, es wird also Wärme freigesetzt. Die freigesetzte Wärme führt zu einer Beschleunigung der Reaktion und einem immer schnelleren Anstieg der Temperatur. Dieser rapide Anstieg der Temperatur resultiert in einem schlagartigen Gelieren des Gebindes. Da mit dem Gelieren ein Anstieg der Viskosität einhergeht, ist die Weiterverarbeitung des Gebindes nicht weiter möglich. Aufgrund des Einflusses der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit hat die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Verarbeitungsdauer, welche mit höheren Temperaturen abnimmt. Darüber hinaus hat die Dicke der Harzschicht einen Einfluss auf die Aushärtungsdauer. Dünne Schichten härten langsamer aus und zeigen eine geringere Wärmeentwicklung als dicke Schichten, da in ihnen weniger Reaktionspartner vorhanden sind als in dicken Schichten. [1] S.113-114

## 2.2 Energieaufnahme von FVK-Werkstoffen

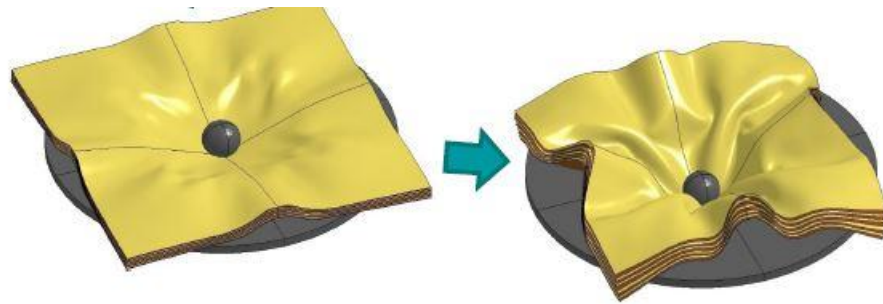
In diesem Kapitel soll darauf eingegangen werden, wie FVK-Strukturen im Impact-Fall die Energie absorbieren. Die Aufnahme der Energie und das Versagen der Struktur hängen zum einen von der Geschwindigkeit des Impacts und der Impactor-Geometrie, zum anderen von dem Lagenaufbau und der Faserorientierung in der Struktur ab.

### 2.2.1 Impactorgeschwindigkeit

Einen großen Einfluss auf das Impactverhalten hat die Impactgeschwindigkeit. Dabei wird grundsätzlich in 3 unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche unterschieden. Der erste Bereich ist der low velocity Impact (LVI), bei dem die Einschlaggeschwindigkeiten kleiner als 10 m/s sind. Es folgt der intermediate velocity Impact (IVI). Bei diesem geschieht der Impact bei Geschwindigkeiten zwischen 10 m/s und 50 m/s. Bei allen Geschwindigkeiten, die größer als 50 m/s sind, ist die Rede vom high velocity Impact (HVI). [2] S.97

Der für diese Arbeit relevante Impact ist der LVI, welcher aufgrund der kleinen Geschwindigkeiten ( $<10$  m/s) in der Regel als quasi statisch angesehen wird. Das Versagensverhalten beginnt bei einem LVI, der quer zur Struktur stattfindet, mit dem ersten Kontakt zwischen dem Impactor und der Struktur. Der Impactor agiert hierbei als starrer Körper. [13] Je geringer die Geschwindigkeit bei einem LVI ist, desto länger sind die Kontaktzeiten

zwischen Impactor und Struktur. Die langen Kontaktzeiten führen dazu, dass die Struktur die Energie besser aufnehmen kann, ohne dabei geschädigt zu werden. Aufgenommen wird die Impactenergie durch elastische Verformung, Vibration oder Wärme. (Abbildung 4) Vor allem dünne Strukturen tendieren dazu, die Energie durch elastische Verformungen zu absorbieren, da sie sich im Gegensatz zu dicken Strukturen eher zum Durchbiegen neigen. Hat die Impactenergie eine Grenze überschritten, bei der die Struktur die Energie nicht mehr komplett aufnehmen kann, kommt es zu Schädigungen an der Struktur. [2] S.98-99, 107



**Abbildung 4: niederdynamischer Impact [13]**

Im Vergleich zum LVI treten beim IVI größere Deformationen auf. Darüber hinaus unterscheiden sich beide Impactarten in Sachen Energieumwandlung und Fehlermechanismen. Bei höheren Geschwindigkeiten wird die Energie in die Schadenergie ( $E_{\text{damage}}$ ) und die Energie ( $E_{\text{SL}}$ ) unterschieden, die durch die Struktur aufgenommen wird, wie Vibration, Wärme, oder elastische Verformung. [2] S.119-120

Der HVI, oder auch ballistischer Impact, bezieht sich in der Regel auf sehr kleine Massen, die bei sehr hohen Geschwindigkeiten in die FVK-Struktur einschlagen. Die hohen Geschwindigkeiten führen zu kurzen Kontaktzeiten. Dies hat zur Folge, dass die Struktur keine Zeit hat die Energie aufzunehmen und elastisch abzubauen. Die Energie wird also fast ausschließlich plastisch abgebaut und es kommt zu lokalen Schadbildern. [2] S.123

## 2.2.2 Fehlerarten

### Matrixbruch

Bei dem LVI treten grundsätzlich 4 verschiedene Fehlerarten auf. Matrixschäden sind eine der ersten Fehlerarten in der Versagenskette des LVI. Matrixbrüche führen zur Ablösung von Fasern und Matrix, sowie zur Delamination. Erste kleinere Schäden entstehen bereits bei Impactenergien von 1-5J. Sie orientieren sich meistens in der Ebene, parallel zu den Faserlagen. Matrixbrüche auf der Seite des Einschlags entstehen durch den Kontakt des Impactors mit der Struktur. Matrixbrüche, die auf der Impactor abgewandten Seite entstehen, bilden sich durch Zug-Biegespannungen. Beide Arten breiten sich im Laminat in der Regel in einer Art Kiefernmuster aus, in einem Winkel von etwa 45°. Die Lage des Mat-



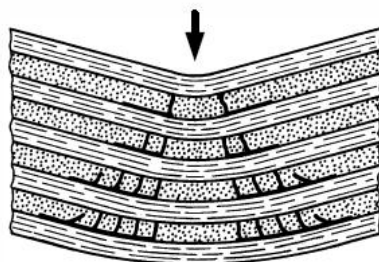
rixbruchs hängt ebenso von der Geometrie des Probekörpers ab. Lange, dünne Geometrien können Energie leichter durch elastische Verformungen, in Form von Verbiegung, aufnehmen, was in der Folge zu Zug- und Biegespannungen an der Unterseite führt, die Matrixbrüche zur Folge haben. Dicke Strukturen wiederum neigen, aufgrund der höheren Steifigkeit, nicht zum Verbiegen, was zu Scherbrüchen direkt unter dem Impactor führt. (Abbildung 5) [2] S.107, 110-111



**Abbildung 5: Kiefernmuster an dünner Probe (li.) und dicker Probe (re.) [2] S.114**

### Delamination

Matrixbrüche dienen als Initiatoren für Delaminationen, die eine weitere Schadensart in der Versagenskette darstellt. Bei der Delamination kommt es zu einer großflächigen Trennung zwischen zwei benachbarten Laminatschichten, mit unterschiedlicher Faserorientierung. Hervorgerufen wird sie durch interlaminare Spannungen. Je größer der Orientierungsunterschied zwischen zwei benachbarten Faserlagen ist, desto eher kommt es zur Delamination. Ursache dafür ist ein Biegesteifigkeitssprung zwischen den Lagen. Den größtmöglichen Versatz stellt also eine Faserorientierung von  $0^\circ$  in der einen Lage und  $90^\circ$  in der benachbarten Lage dar. Eine Delamination, die durch Querbelastung hervorgerufen wird, tritt erst auf, nachdem eine Schwellenenergie überschritten wurde. Es können Matrixbrüche als Auslöser für Delaminationen dienen. (Abbildung 6) [2] S.107-108



**Abbildung 6: Delamination Aufgrund von Matrixbrüchen [1] S.386**

### Faserbruch

Die nächste Schadensart, die nach Matrixbrüchen und Delamination im Versagenprozess auftritt, sind die Faserbrüche. Ursache dafür sind die besseren Festigkeitseigenschaften



und der höhere Elastizitätsmodul der Fasern. Faserbrüche treten in der Regel unter dem Impactor auf, da an dieser Stelle hohe lokale Spannungen herrschen. Aber auch die hohen Biegespannungen auf der Impact abgewandten Seite können zu Faserbrüchen führen. Im Falle der axialen Druckbelastung ist das Schubknicken Hauptursache für Faserbrüche. Durch die geschädigte Matrix ist ein Umlagern der Kräfte auf benachbarte Fasern nur noch begrenzt oder gar nicht möglich. [2] S.108-109

### **Penetration**

Penetration ist die letzte Schadensart in der Versagenskette und wird durch Faserbrüche begünstigt. Sie ist eine makroskopische Versagensart, die auftritt, wenn eine gewisse Anzahl an Faserbrüchen überschritten wurde und dem Impactor erlaubt, komplett in die Struktur einzudringen. Die Grenzenergie für eine Penetration steigt stark mit zunehmender Probendicke an. Meistens tritt Penetration bei ballistischen Einschlägen auf. [2] S.109

### **2.2.3 Impactor-Geometrie**

In Abbildung 7 ist die Abhängigkeit der Schadfläche von der Impactenergie und der Impactor-Geometrie dargestellt. Dabei wird zwischen scharfkantigen, spitzbogenförmigen und stumpfen Impactoren unterschieden. Scharfkantige Impactoren führen bereits bei niederen Impactenergien zu Schäden an der Struktur. Die Schäden treten dabei lokal auf und sind hauptsächlich oberflächlicher Art und Faserbrüche. Bei der Spitzbogenform sind bereits höhere Impactenergien nötig, um Schäden an der Struktur hervorzurufen und die Schadfläche ist größer als bei dem scharfkantigen Impactor. Es treten neben Faserbrüchen auch Delaminationen auf. Stumpfe Impactoren werden in leicht und schwer unterschieden. Da bei den leichten stumpfen Impactoren eine höhere Impactgeschwindigkeit nötig ist, um gleiche Impactenergien zu erzielen, konzentrieren die leichten Impactoren die Energie lokaler als schwere Impactoren. Letztere weisen längere Kontaktzeiten auf und geben der Struktur die Möglichkeit, die Energie zu absorbieren. Gemeinsam haben beide stumpfen Impactoren, dass sie großflächige Schäden, vor allem Delaminationen, hervorrufen. [2] S.110

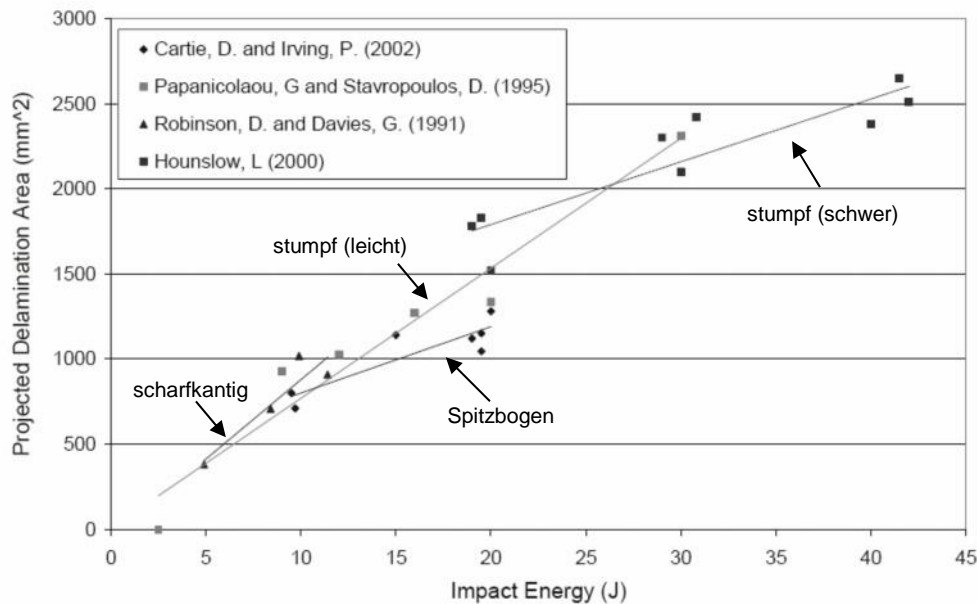


Abbildung 7: Einfluss von Impact-Energie und Impactor-Geometrie [2] S.113

## 2.3 Bestimmung Faservolumengehalt

Die Eigenschaften des Faserverbundes richten sich auch nach dem Anteil von Fasern und Matrix im Verbund. Besonders die Fasern haben einen großen Einfluss auf Festigkeit und Steifigkeit der Struktur und dementsprechend ist der Faservolumenanteil einer der wichtigsten Konstruktionsparameter. Es ist deshalb sinnvoll, den Faservolumengehalt relativ hoch zu halten, jedoch sollte er möglichst nicht 65% überschreiten, da sonst die Fasern zu eng aneinander liegen und sie dementsprechend schlechter benetzt werden können. Das hat zur Folge, dass im Laminat Trockenstellen auftreten können, die wie Fehlstellen wirken. Außerdem kann es an diesen Stellen zu Reibungen zwischen den Fasern kommen und diese können, in Folge der Reibung, brechen. [1]. S.161

Eine Möglichkeit, den Faservolumengehalt zu bestimmen, ist die Veraschung. Dazu wird eine Probe der zu testenden Verbundstruktur benötigt. Bevor die Probe in einem Ofen verkocht wird, muss die Masse der Probe bestimmt werden. Die Temperatur im Ofen wird auf über 400°C eingestellt, da sich die Epoxidmatrix bei Temperaturen über 400°C zersetzen und zu Kohlenasche wird. Die Probe bleibt so lange in dem Ofen, bis sich der Matrixwerkstoff komplett zersetzt hat. In der Folge bleiben lediglich die Fasern zurück, von denen anschließend die Fasermasse bestimmt wird. Mit der Formel 1 kann der Fasermassenanteil berechnet werden: [1] S.163-164

Formel 1:

$$\psi = \frac{m_{\text{Fasern}}}{m_{\text{Verbund}}}$$

Mit Formel 2 lässt sich in der Folge der relative Faservolumenanteil errechnen. [1] S.164

**Formel 2:**

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{(1-\psi)}{\psi} \times \frac{\rho_f}{\rho_m}}$$

Ein weiteres Verfahren ist die Bestimmung des Faservolumengehalts durch analytische Methoden. Über die Faserlagenanzahl, die Grundfläche der Proben und das Flächengewicht der Faserlagen lässt sich die Masse der Fasern berechnen. (Formel 3)

**Formel 3:**

$$m_{\text{Fasern}} = n \cdot \left( \frac{m_f}{L \times b} \right) \cdot A$$

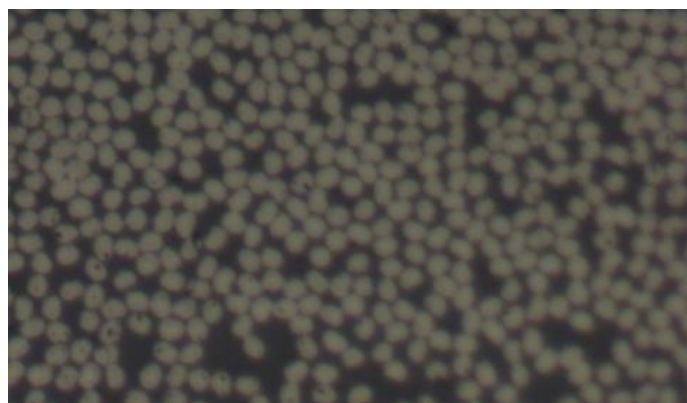
Mit Hilfe der Formel 1 lässt sich in der Folge der relative Faservolumengehalt berechnen.

Darüber hinaus lässt sich über die Probendicke und die Anzahl der Faserlagen der Faservolumengehalt ermitteln. Zusätzlich werden das Faserhalbzeug-Flächengewicht und die Faserdichte benötigt. Der Faservolumengehalt wird über die Formel 4 errechnet. [1] S.167

**Formel 4:**

$$\varphi = \frac{\left( \frac{m_f}{L \times b} \right) \times n}{t_{\text{soll}} \times \rho_f}$$

Und schließlich gibt es noch die Möglichkeit, den Faservolumengehalt mittels Grauwertkorrelation zu ermitteln. Hierzu werden Mikroskopaufnahmen über eine computergestützte Software ausgewertet. Ein entsprechendes Programm wäre z.B. ImageJ. Es ist sinnvoll, bei der Auswertung Bereiche zu wählen, in denen ausschließlich Fasern zu sehen sind, die in 90° zur Schlifffläche liegen. (Abbildung 8)



**Abbildung 8: Mikroskop-Bild von Fasern**

Der große Vorteil der Veraschung ist, dass sehr genau die Fasermasseanteile, in der FVK-Struktur ermittelt werden können, um aus diesen anschließend den Faservolumenanteil zu errechnen. Jedoch existieren auch Nachteile bei diesem Verfahren. Bei der Verarbeitung von fremden Stoffen im Verbund besteht die Gefahr, dass diese sich nicht kom-

plett zersetzen. Somit kann durch dieses Verfahren keine korrekte Bewertung des Faservolumengehalts für Lamine mit Zwischenschichten vorgenommen werden.

Bei den analytischen Methoden besteht dieses Probleme nicht. Die Zwischenschichten werden herausgerechnet. Allerdings wird kein exakter Wert für den Faservolumengehalt ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass alles, was in der Struktur nicht Fasern sind, Matrix ist. Fehlerstellen in der Matrix werden dementsprechend nicht in der Berechnung berücksichtigt. Bei der Bestimmung des Faservolumengehaltes über die Probendicke werden Fehler in der Probe nicht in die Berechnung einbezogen.

Das ungeeignetste Verfahren ist wohl die Bestimmung des Faservolumengehalts mittels Grauwertkorrelation. Zum einen werden nur einzelne Bereiche betrachtet und zum anderen wird angenommen, dass alles, was nicht Fasern sind, Matrix ist. Die Bilder geben also keine repräsentative Menge des ganzen Faserverbundes an, um den Faservolumengehalt zu bestimmen.

## 2.4 Bestimmung des Fehlergehalts

Ein weiterer Kennwert, der zur Bestimmung der Probenqualität dient, ist der Fehlergehalt. Er gibt an, wie viele Lufteinschlüsse oder Fremdpartikel in der FVK-Struktur vorhanden sind. Fehler beeinflussen die Matriceigenschaften, wie Steifigkeit oder Festigkeit, negativ. Außerdem haben Fehlstellen eine Kerbwirkung und wirken Riss- und Delaminationsfördernd. Bestimmt wird der Fehlergehalt mittels Grauwertkorrelation. Das Vorgehen ist das Gleiche wie beim Bestimmen des Faservolumengehalts über die Grauwertkorrelation. Es sollten möglichst große Bereiche, mit Fasern die in  $90^\circ$  zur Schlieffläche liegen, betrachtet und ausgewertet werden, da in diesen Bereichen sehr gut das Verhältnis zwischen Fasern und Matrix zu sehen ist. (Abbildung 9) Im Gegensatz zur Faservolumengehaltbestimmung sind bei der Fehlergehaltbestimmung nicht die Fasern durch das Programm eingefärbt, sondern die Fehlstellen. Bei jeder Probe werden mehrere zufällige Stichproben gemessen und ein Mittelwert gebildet.

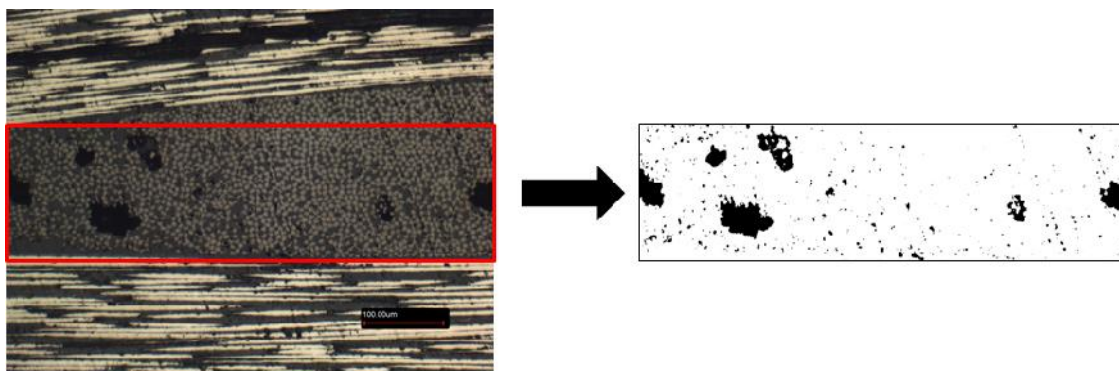
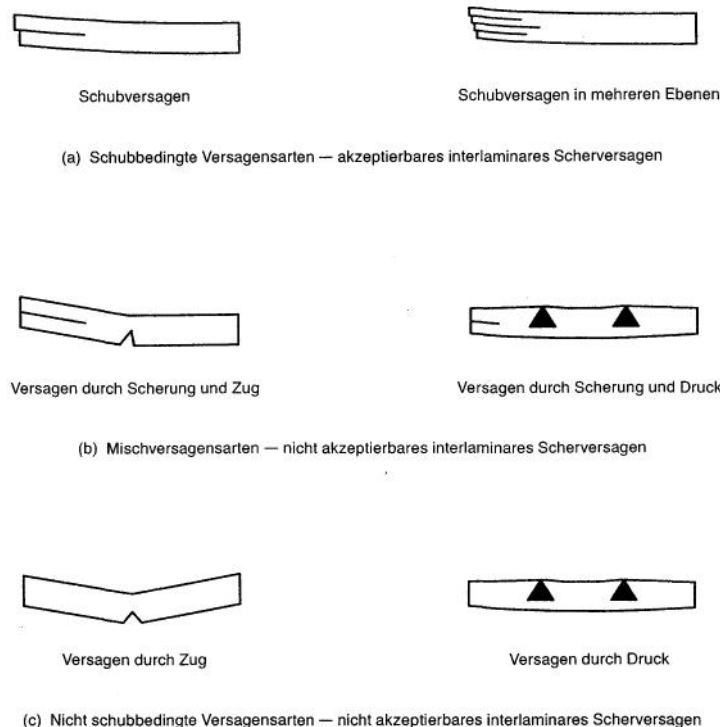


Abbildung 9: Ermittlung Fehlergehalt mittels Grauwertkorrelation

## 2.5 Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit

Der ILS-, oder auch ILSS-Test, nach Norm DIN EN ISO 14130 [18], dient dazu, die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit an FVK-Strukturen zu bestimmen. Diese zeigt auf, wie gut die Haftung zwischen Faser und Matrix ist, bzw. inwiefern 2 benachbarte Laminatschichten zu einem Scherversagen neigen. Im Zuge dieser Arbeit wird des Weiteren aufgezeigt, welchen Einfluss die Schlagschutzarten auf die interlaminare Scherfestigkeit ausüben. Dabei sind akzeptierte Versagensarten Schubversagen in einer oder mehreren Ebenen. Im Gegensatz dazu werden Versagen durch Scherung, Zug und Druck nicht akzeptiert. (Abbildung 10)



**Abbildung 10: Mögliche Versagensarten beim ILS-Test [18]**

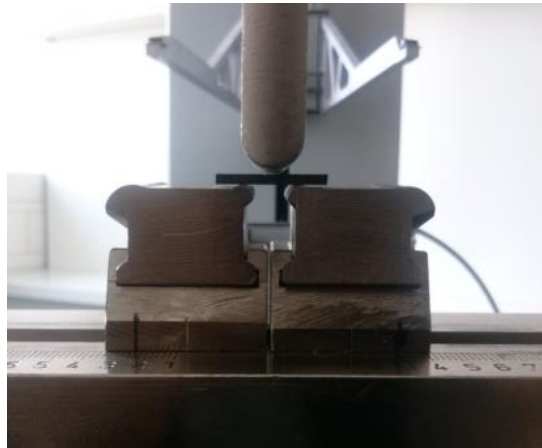
Während des Versuchs wird der Kraft-Weg-Verlauf gemessen. Für den Fall des Schubversagens lässt sich die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit mit der Formel 5 berechnen:

**Formel 5:**

$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \times h_{probe}}$$

Bei unerwünschten Versagensfällen ergibt sich nach Gleichung (5.5.) nicht die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit. Laut Norm sind die Ergebnisse nur innerhalb der gleichen Prüfreihe und bei gleichem Werkstoff vergleichbar.

Der ILS-Test ist ein Dreipunktverfahren mit kurzem Balken. Der Probekörper hat einen rechteckigen Querschnitt und liegt auf zwei Auflagern, die einen Abstand von 10mm und einen Radius von 2mm haben. Der Probekörper ist symmetrisch zwischen den Lagern anzuordnen. In der Mitte und parallel zu den Auflagern wird eine Kraft mit Hilfe einer Druckfinne ausgeübt. (Abbildung 11) Der Radius der Druckfinne beträgt 5mm. Die Probekörper besitzen eine Dicke von 2mm, eine Länge von 20mm und eine Breite von 10mm. (Abbildung 12) Es sind mindestens 5 Probekörper zu untersuchen. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1mm/min und ist konstant zu halten.



**Abbildung 11: Prüfvorrichtung ILS-Test**



**Abbildung 12: Probenmaße ILS-Proben**

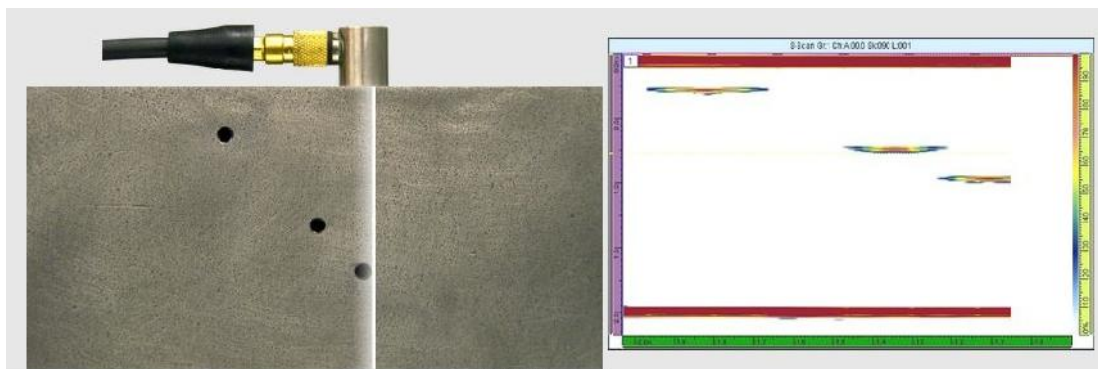
## 2.6 Ultraschallprüfung zur Bestimmung der Schadflächen

Die Ultraschallprüfung ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem Materialfehler auffindig gemacht werden können. Für die Ultraschallprüfung wird ein Koppelmittel, wie Wasser, Gel, oder Öl benötigt, welches auf die Werkstückoberfläche aufgetragen wird. Ein Ultraschallkopf sendet Ultraschallwellen in einer Frequenz von 0,5 bis 25 MHz aus. Er agiert dabei nicht nur als Sender, sondern auch als Empfänger der Wellen und fährt die zu untersuchende Oberfläche ab. Trifft das Signal auf Grenzflächen, wie Lufteinschlüsse oder Fremdkörper, im inneren des Teils, werden die Schallimpulse reflektiert und an den Prüfkopf zurückgesandt. Der zurückgelegte Weg wird über die vergangene Zeit zwischen Versenden des Signals und Empfangen des Signals berechnet. Über die gemessene Zeitdifferenz wird in der Folge ein elektronisches Bild erzeugt, welches über einen Monitor

dargestellt wird. Dieses Bild kann eine Auskunft über Lage und Größe des Fehlers geben. Dabei gibt es mehrere unterschiedliche Darstellungsvarianten von Fehlerbildern. [32]

Die einfachste mögliche Bilddarstellung ist das A-Bild. Das A-Bild ist ein Diagramm, bei dem die Echoamplitude über den Zeitverlauf dargestellt wird. Wenn eine Ultraschallwelle reflektiert wird, sorgt dies für einen Ausschlag im Diagramm welches aufzeigt, in welcher Tiefe das Signal reflektiert wurde. [33]

Eine weitere Darstellungsform ist das B-Bild. In diesem Bild wird angezeigt, in welcher Tiefe und an welcher Position des Prüfweges sich die Fehlstelle befindet. Es wird, während der Prüfkörper abgetastet wird, ein Tiefenprofil der Struktur erstellt. Bei diesem wird die Dicke über die Zeit oder Position aufgezeichnet. [34] Ein ähnliches Bild ist das S-Bild. In diesem wird allerdings immer das momentane Tiefenprofil unter dem Prüfkopf dargestellt. Dieses Bild zeigt damit ein Tiefenprofil, welches quer zu dem B-Bild liegt. In Abbildung 13 ist das B-Bild eines Metallkörpers mit Lufteinschlüssen dargestellt. Im B-Bild ist die genaue Position und Tiefenlage der Fehlstellen zu sehen.

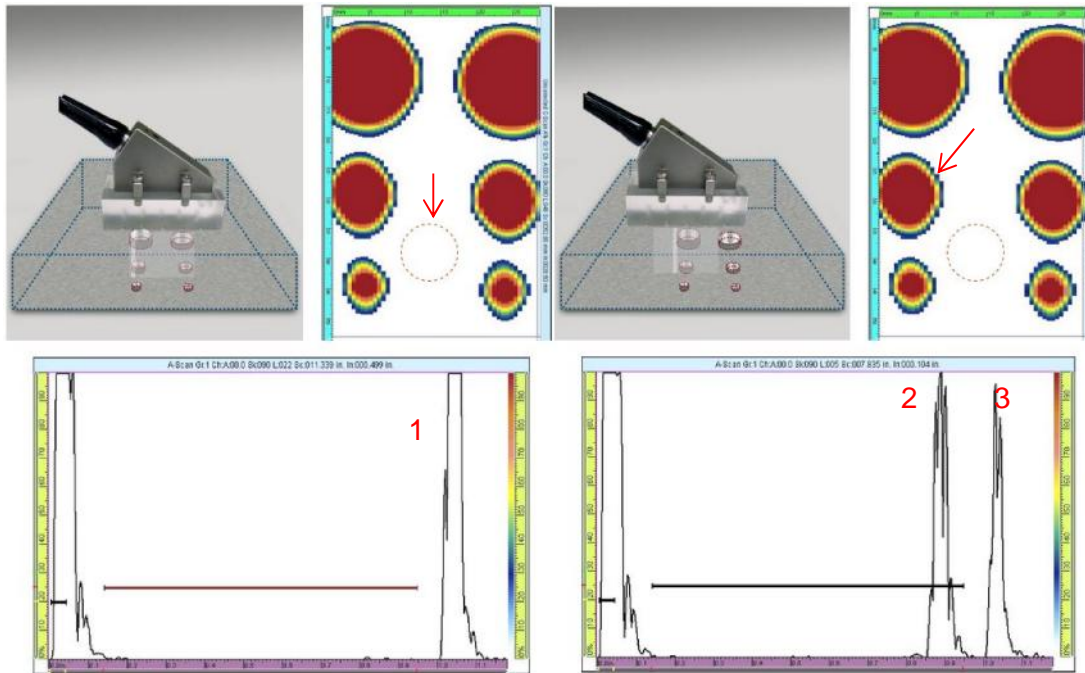


**Abbildung 13: B-Bild [34]**

Im C-Bild, einer weiteren Darstellungsform, wird eine zweidimensionale Darstellung als flächige Draufsicht abgebildet. Die Darstellung ist einem Röntgenbild ähnlich. Unterschiedliche Tiefen des Signals werden in unterschiedlichen Farben dargestellt.

Bei Prüfteilen mit flachen Oberflächen erfolgt die Zuordnung der Daten, zum Erzeugen des Bildes, über die X-Y-Position. Im Gegensatz dazu erfolgt die Zuordnung der Daten bei zylindrischen Prüfflächen über die Achs- und Winkelposition. [35] In Abbildung 14 sind im Bild das A- und C-Bild eines Metallkörpers abgebildet. Das C-Bild zeigt dabei eine Draufsicht auf die Fehler, mit deren Position und deren Ausdehnung in X-Y-Richtung. Links im Bild befindet sich der Prüfkopf an einer Stelle an der keine Einschlüsse im Körper sind. Im A-Bild ist lediglich das Rückwandecho zu beobachten (Nr.1). Rechts im Bild befindet sich der Prüfkopf dagegen an einer Stelle mit einem Einschluss. Das erste Echo (Nr.2) zeigt dabei die Reflektion des Einschlusses, während das zweite Echo (Nr.3) wieder das Rückwandecho zeigt.





**Abbildung 14: A- und C-Bild [36]**

In dieser Arbeit wird die Ultraschallprüfung mit einem Omniscan SX durchgeführt und die Auswertung der Schadflächen erfolgt mit der Software OmniPC – 4.4R3. Der Prüfweg wird über einen Weggeber gemessen, der während der Messung mit dem Prüfkopf mitgeführt wird. (Abbildung 15)



**Abbildung 15: Omniscan SX (li.) und Prüfkopf mit Weggeber (re.)**



### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Herstellungsverfahren von FVK

Ein Herstellungsverfahren ist das Handlaminieren. Bei diesem Verfahren werden die Faserhalbzeuge per Hand in ein Formwerkzeug gelegt, welches die Kontur des Bauteils besitzt. Die Formwerkzeuge sind hierbei offen und muldenartig oder gewölbt. Bei dem Verfahren ist darauf zu achten, dass die Formwerkzeuge vor der Benutzung gewartet und gereinigt werden, um in der Bauteiloberfläche keine Fremdeinschlüsse bzw. Kerben zu haben. Außerdem muss die Form vor der Benutzung mit einem Trennmittel eingetrennt werden, damit sich das Bauteil nach dem Aushärten ohne Probleme von der Form löst. Nach dem Auftragen und Aushärten des Gelcoats werden die Faserhalbzeuge mit dem Matrixwerkstoff getränkt und in die Form gelegt und verdichtet. Mit einer Rolle kann das Laminat zwischendurch entlüftet und überflüssiges Harz entfernt werden. (Abbildung 16) Dieser Vorgang wird bei jeder Lage wiederholt, bis alle Schichten verarbeitet sind. Das Bauteil härtet anschließend entweder alleine aus, oder die Aushärtung geschieht unter Hitze. Nach dem Aushärten wird das Bauteil entformt und das Formwerkzeug kann erneut verwendet werden.

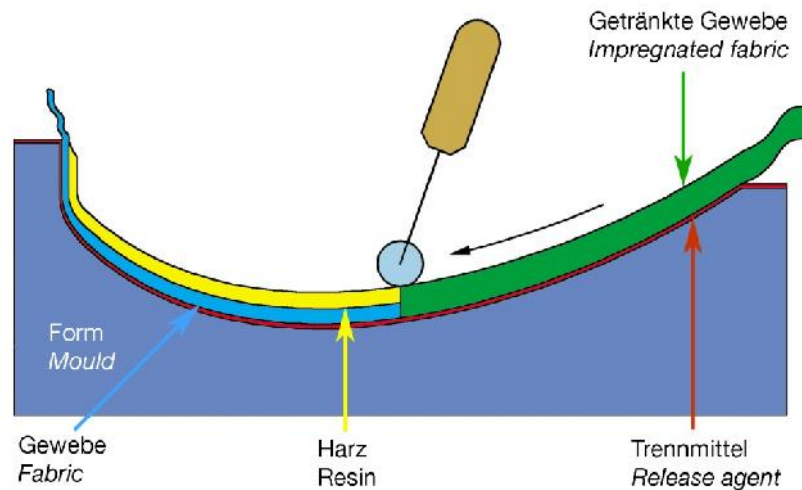
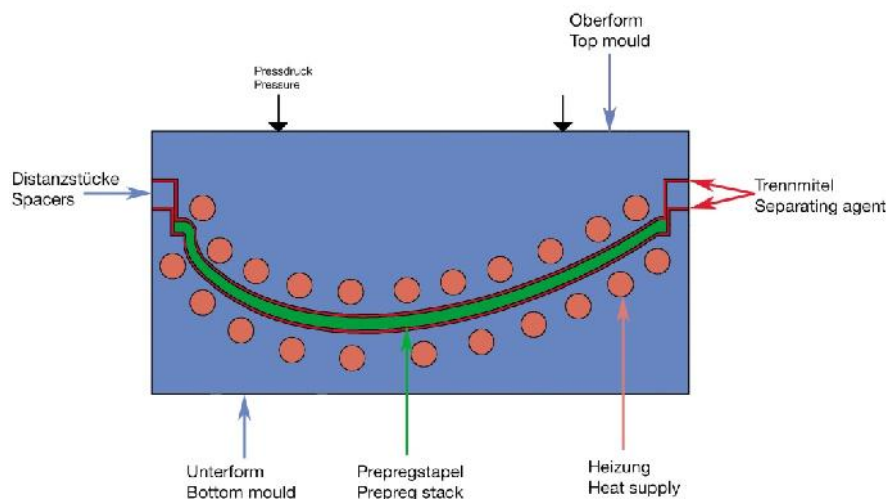


Abbildung 16: Handlaminieren [37]

Vorteile dieses Verfahrens sind vor allem die Freiheiten bei der Bauteilgestaltung, auch schwierige Geometrien sind möglich und es können beliebige Laminataufbauten realisiert werden. Des Weiteren liegen bei der Oberfläche freie Gestaltungsmöglichkeiten vor und es können glatte Oberflächen realisiert werden. Jedoch haben Bauteile, die durch Handlaminieren entstanden sind, nur eine Gutseite. Nachteilig sind bei diesem Verfahren lange Fertigungszeiten und eine, aufgrund handwerklicher Einflüsse, bedingte Reproduzierbar-

keit. Qualifiziertes Personal ist also zwingend erforderlich, um eine möglichst hohe Bauteilqualität zu erzielen. Wirtschaftlich ist das Handlaminieren hauptsächlich bei kleinen Stückzahlen oder Einzelfertigungen. [5] S.311-313

Ein weiteres Verfahren ist das Nasspressen. (Abbildung 17) Wie beim Handlaminieren wird bei dem Nasspressen in einer Form laminiert. Der Unterschied zum Handlaminieren ist, dass es sich um eine zweiteilige Form handelt. Nach Beendigung des Laminier-Vorgangs wird die Form in eine Presse gegeben und härtet unter Druck, teilweise in Kombination von höheren Temperaturen, aus. Ebenso wie beim Handlaminieren muss die Oberfläche vor der Nutzung gereinigt und eingetrennt werden, um eine möglichst hohe Oberflächenqualität zu erzielen. Die Presse sollte bei diesem Verfahren langsam schließen, da beim Einsetzen der Presskraft hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Harz vorliegen, die zu einem Aufschwimmen der Faserhalbzeuge führen und in der Folge Faltenbildung begünstigen. Qualifiziertes Personal ist bei dem Nasspressen genauso erforderlich wie beim Handlaminieren und es ist ebenso hauptsächlich bei kleinen Stückzahlen oder Einzelfertigungen wirtschaftlich, da lange Fertigungszeiten vorliegen. [5] S.331-332



**Abbildung 17: Nasspressen [38]**

Darüber hinaus gibt es noch das Vakuumpressen ein Verfahren, bei dem das laminierte Bauteil unter Vakuum aushärtet. [24] Beim Harzinjektionsverfahren RTM wird das Harz wiederum durch Druck in die Werkzeugform injiziert, in dem sich die ungetränkten Verstärkungsfasern befinden. [25] Weitere Verfahren zur FVK-Herstellung sind außerdem noch das Wickelverfahren, welches sich besonders bei rotationssymmetrischen Bauteilen eignet [5] S.346, das Autoklavverfahren, ein sehr teures Verfahren, bei dem vor allem komplexe Bauteile, in einem luftdichten Druckbehälter, hergestellt werden, [23] oder das Profilziehverfahren, bei dem, wie der Name bereits sagt, vor allem Profile hergestellt werden. [5] S.361 Da die in diesem Abschnitt genannten Herstellungsverfahren für die vorliegende Arbeit nicht weiter relevant sind, wird an dieser Stelle nicht weiter auf sie eingegangen.

## 3.2 Möglichkeiten zur Verbesserung der Impacteigenschaften

In diesem Kapitel soll auf die Möglichkeiten eingegangen werden ein FVK-Laminat gegen einen Impact zu schützen. Die drei grundsätzlichen Möglichkeiten hierbei sind die Modifikation der Matrix, das Einfügen interlaminarer Zwischenschichten und die Verstärkung der Fasern, bzw. das Verarbeiten artfremder Fasern.

### 3.2.1 Modifikation der Matrix

Eine Möglichkeit die Impacteigenschaften zu verbessern, ist die Modifikation der Matrix. Dies geschieht in der Regel durch die Addition von Partikeln. Klassische Partikel sind Elastomer-, Thermoplast- oder Nanopartikel. Der Hauptmechanismus, durch den die Partikel die Matrix-Eigenschaften verbessern, ist dabei die Brückenbildung. Die Partikel halten die beiden Rissoberflächen zusammen und sorgen dafür, dass der Riss nicht weiter aufreißt. (Abbildung 18) [9] S.1-2 Elastomer-Partikel haben allerdings den Nachteil, dass sie zwar die Schlag- und Bruchzähigkeit verbessern, allerdings auch die thermische Stabilität, die Festigkeit und die Steifigkeit negativ beeinflussen. Dabei sind Thermoplast-Partikel besser geeignet. Thermische Stabilität, Festigkeit und Steifigkeit, werden, im Vergleich zum Einsatz von Elastomer- Partikeln, durch sie weniger negativ beeinflusst. [10] S.3 Nanopartikel wiederum sorgen für eine Verbesserung der Zähigkeit, ohne andere mechanische Eigenschaften negativ zu beeinflussen. Außerdem liegen im Vergleich zu Elastomer- und Thermoplastpartikeln, durch die geringe thermische Ausdehnung, geringere thermische Spannungen im Matrixwerkstoff vor. Es gibt mehrere verschiedene Arten von Nanopartikeln: zum einen die zähen Partikel, wie Silikon- oder Kautschukpartikel und zum anderen die steifen Partikel, wie Siliziumoxide oder Böhmite. [7] S.5 Die Partikelauswahl richtet sich nach den gewünschten Eigenschaften, bzw. besteht die Möglichkeit, mehrere Partikelarten gleichzeitig zu verwenden. Neben der Brückenbildung sorgen die Nanopartikel vor allem noch für eine Rissablenkung und das Crack-Pinning, also das Zusammenheften der beiden Rissflächen. [8] S.19 Zum Einsatz kommen die Verschiedenen Arten von Partikeln, in Sportgeräten, Windrädern oder in der Luftfahrt, wie z.B. in einem Flugzeugrumpf aus CFK. [7] S.1

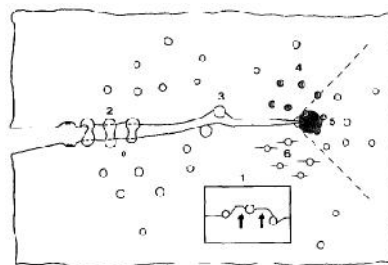
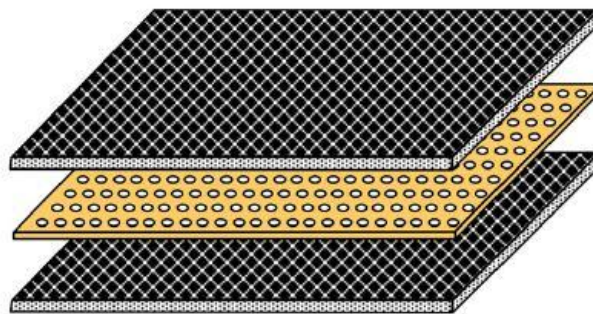


Abbildung 18: Wirkmechanismen von Partikeln [9]

### 3.2.2 Interlaminare Zwischenschichten

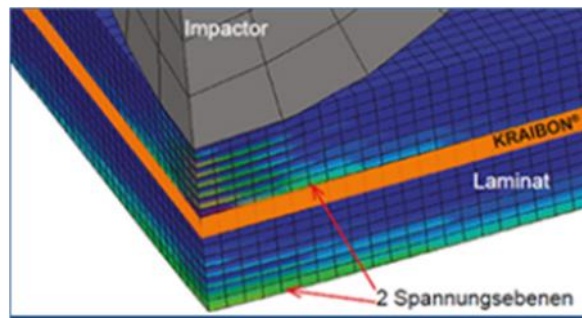
Eine weitere Möglichkeit für einen Schlagschutz ist das Einfügen interlaminarer Zwischenschichten. Diese Schichten werden zwischen zwei Faserlagen eingefügt und sollen dafür sorgen, dass durch sie der Schlag gedämpft wird und durch die Schichten möglichst viel Energie absorbiert wird. Eine Variante ist es, Folien in die Lamine einzufügen, ähnlich wie bei Verbundglas. Durch die Folien als Zwischenschichten entsteht ein weniger poröses Schadensverhalten. Das Problem dabei ist die Anbindung an das restliche Laminat. Durch die sehr glatte Oberfläche wird, im Impact-Fall, Energie u.a. durch Delamination absorbiert.



**Abbildung 19: Gelochte Folie als interlaminare Zwischenschicht [15] S.3**

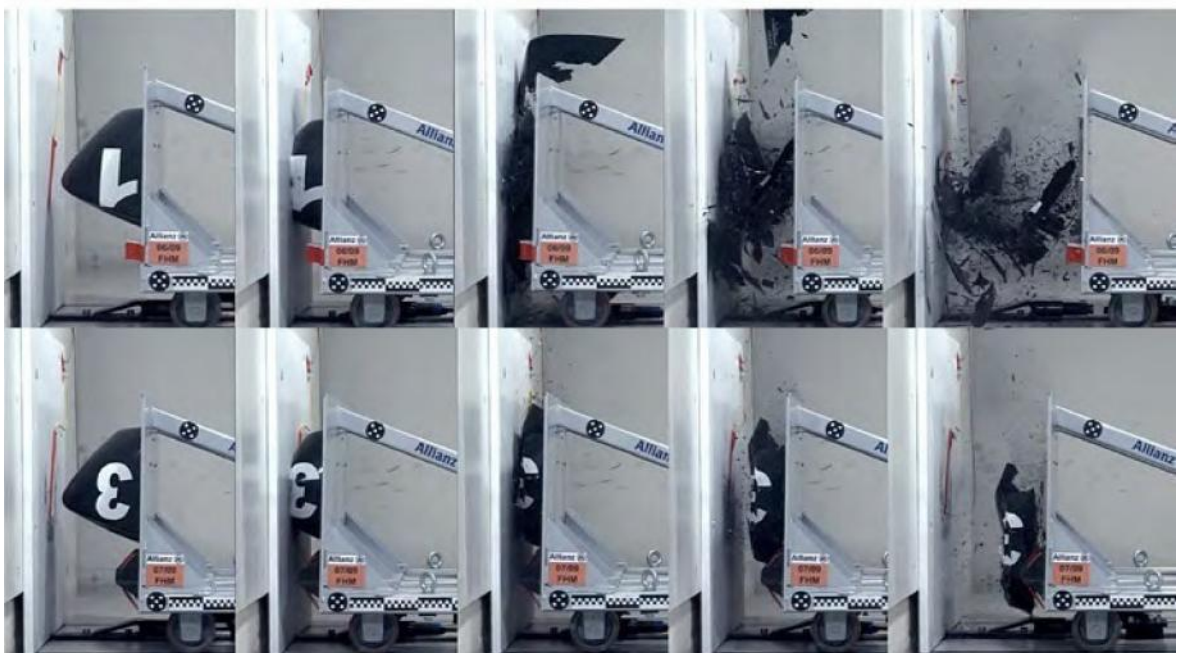
Durch Perforieren, bzw. Lochen der Folien wird die Anbindung der benachbarten Faserlagen zueinander eingestellt und so gewissermaßen die Delamination beeinflusst. (Abbildung 19) Je größer die Kontaktfläche zwischen den angrenzenden Faserlagen ist, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Delamination eintritt. [15] S.1-3 Eine weitere Möglichkeit, die Anbindung der Folien zu verbessern, ist das Anrauen der Oberfläche, da diese so vergrößert wird. Metall-Folien aus Stahl oder Aluminium sind eine weitere Art von interlaminaren Zwischenschichten. Es entsteht eine Art Hybrid-Laminat. [14] S.1-2 Bei den Metall-Folien besteht ebenso die Gefahr einer schlechten Anbindung, wie bei PET-Folien, weshalb bei den Metall-Folien genauso nach möglichen Verfahren gesucht werden muss, welche die Anbindung verbessern. Das Lochen oder Anrauen ist dabei schwieriger realisieren. Des Weiteren besteht die Gefahr der Korrosion der Metall-Folien bei Kontakt mit dem Epoxidharz, weshalb vor dem Einsatz der Metall-Folien die elektrochemischen Potentiale der Matrix und der Folien betrachtet werden müssen. Hinzu kommt außerdem, dass Metall-Folien im Vergleich mit PET-Folien teurer und schwerer sind und so das Bauteilgewicht steigt.

Der Einsatz von EPDM als Zwischenschicht ist bereits eine gängiges Verfahren, um das Impactverhalten zu verbessern. Es nimmt die Impactenergie auf und verteilt sie auf mehrere Spannungsebenen. (Abbildung 20)



**Abbildung 20: Einsatz von Kraibon® [27]**

Darüber hinaus dient es als Vibrationsdämpfer und Splitterschutz. [11] S.5 Im Straßenverkehr können herumfliegende Splitter zur Gefahr für Passanten werden. Kraibon® führt zu einem weniger spröden Werkstoffverhalten. (Abbildung 21) Bei der Verarbeitung werden keine zusätzlichen Haftvermittler benötigt und es ist frei formbar. Jedoch sind zur Vulkani-sation EPDM-Schichten über 110°C nötig, weshalb es nicht mit allen Harzsystemen kompatibel ist. Das Verarbeiten der EPDM-Lagen führt außerdem zu einer Gewichtsreduktion der Strukturen, da so weniger Faserlagen in der Struktur nötig sind. [27], [12] Zum Einsatz kommt es bereits in einigen Branchen, wie der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, bei Schienenfahrzeugen, in medizinischen Anwendungen und in Sportgeräten. [26]



**Abbildung 21: Crashelement ohne Kraibon® (oben) und mit Kraibon® (unten) [21]**

### 3.2.3 Verstärkung der Fasern

Das Einfügen von artfremden Fasern zur Verstärkung des Laminats ist eine weitere Möglichkeit eines Schlagschutzkonzeptes. Geeignet hierfür sind Fasern wie Aramidfasern, oder Dyneema, eine synthetische Faser auf Polyethylenbasis. Aramidfasern zeichnen sich durch eine hohe Zähigkeit aus, weshalb es bereits gängig ist, Aramidfasern zur Verstärkung von Kohlenstofffasern einzusetzen, um deren schlechte Schlagzähigkeit zu verbessern. [1] S.632, [29] Genauso zeichnet sich Dyneema durch sehr gute Zugfestigkeitswerte aus und ist im Vergleich zu Aramidfasern leichter. [28] Nachteilig ist, dass Dyneema eine selbsttrennende Wirkung gegenüber Epoxidmatrixsystemen aufweist und dementsprechend die Anbindung nicht gut ist. Des Weiteren lassen sich Aramid- und Dyneema-Fasern durch ihre hohe Zähigkeit schlecht zuschneiden und verarbeiten. Vor allem der Einsatz von Aramidfasern, aber auch Dyneema-Fasern, in ballistischen Anwendungen ist eine gängige Methode. Zum Einsatz kommen die Fasern, in reiner Form, in Schutzwesten oder, in Kombination mit hochzähen Matrixsystemen, in Helmen. (Abbildung 22) [1] S.44, [39]



Abbildung 22: Kevlarhelm [40]

## 4 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aufgrund des spröden Schadensverhaltens und des geringen Lastaufnahmevermögens quer zur Faserrichtung ist der Impact an FVK-Strukturen sehr komplex und wurde bereits vielfach untersucht. Ziel dieser Arbeit ist es, sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen und in der Folge einen Schlagschutz zu finden, der die Schäden minimiert. Es gilt vor allem, innere Schäden stark einzuschränken, die nicht zu erkennen sind und in der Folge zu einem abrupten Versagen führen können. Innere Schäden treten vor allem bei Impacts im niederen bis mittleren Geschwindigkeitsbereich auf, weshalb es gilt, diese Geschwindigkeiten zu betrachten. Unter Berücksichtigung der Energieaufnahme und der potenziellen Versagensarten gilt es, unterschiedliche Schlagschutzarten auszuwählen und diese unter experimentellen Gesichtspunkten zu untersuchen. Folgende Anforderung sollte der Schlagschutz dabei erfüllen:

- Integrität in die FVK-Struktur (auch nach dem Impact)
- Verbesserung der Schlagzähigkeit
- möglichst geringe negative Beeinträchtigung der mechanischen, chemischen und thermischen Eigenschaften
- Erhalt der inneren Struktur und damit Verhinderung eines unangekündigten katastrophalen Versagens

Um herauszufinden, welche Schlagschutzart die Anforderungen am besten erfüllt, soll wie folgt vorgegangen werden:

- Vorauswahl an Schlagschutzkonzepten
- Vorversuche zum Testen der Integrität des Schlagschutzes
- Probengeometrie und Lagenaufbau festlegen
- Konstruieren einer Probenaufnahme und Impactor-Geometrie
- Durchführen der Impactversuche
- Mikroskopieren und Ultraschallprüfung nach den Impactversuchen

Um die Integrität der Schlagschutzarten zu testen, wird ein ILS-Test durchgeführt. Dieser Test dient zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit. Der Test zeigt auf, wie sich die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit mit den verschiedenen Schlagschutzarten verändert und wie die Anbindung der Konzepte ist.



Des Weiteren gilt es, einen geeigneten Lagenaufbau zu finden. Wichtige Parameter sind dabei der Faservolumengehalt und die Faserorientierung. Ein quasiisotroper Aufbau erweist sich hierbei als positiv, da bei diesem Aufbau in der Ebene eine gleichmäßige Energieaufnahme in jeder Richtung möglich ist. Darüber hinaus beeinflusst die Lage der Zwischenschichten die Postimpacteigenschaften. Die Probengeometrie orientiert sich an der Probenaufnahme.

Bei der Probenaufnahme ist darauf zu achten, dass sie eine ausreichende Steifigkeit aufweist und die Impactenergie komplett durch das Laminat aufgenommen wird und nicht durch Verformung der Probenaufnahme. Auch die Verspannung der Probe ist bei der Aufnahme der Impactenergie ein entscheidender Faktor, um eine gleichmäßige Energieaufnahme zu ermöglichen.

Die Wahl der Impactor-Geometrie hängt davon ab, welche Schadensarten zu erwarten sind und wie sich die einzelnen Impactorgeometrien in den unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen verhalten. Während bei einer stumpfen Geometrie und niederen Geschwindigkeiten großflächigere Schäden zu erwarten sind, führen eine spitze Geometrie und höhere Geschwindigkeiten hauptsächlich zu lokalen Schäden. Gleiches gilt für den Impactor-Durchmesser, je größer dieser ist, desto großflächiger sind die zu erwartenden Schäden.

Vor den Impactversuchen gilt es, noch einmal die Probenqualität zu bestimmen, also Fehlergehalt und Faservolumengehalt, um so nach den Impactversuchen eventuell Rückschlüsse von den Ergebnissen auf die Probenqualität ziehen zu können.

Für die Impactversuche ist es wichtig, eine Impactenergie zu bestimmen und nach Bestimmung der Masse des Impactors über die kinetische Energie die benötigte Geschwindigkeit zu berechnen.

Nach den Impactversuchen sollen die Ergebnisse dann mittels Mikroskopie und Ultraschall ausgewertet werden. Schäden wie Delamination oder Faserbrüche können so in ihrer Form und Größe genau bestimmt werden.

Die Ergebnisse geben eine Aussage zur Eignung des jeweiligen Schlagschutzes und dienen als Grundlage für die weitere Entwicklung eines Schlagschutzkonzeptes.



## 5 Voruntersuchungen

### 5.1 Auswahl der zu untersuchenden Schlagschutzarten

Ziel dieser Arbeit soll es sein, innere Schäden, wie Matrixbrüche und Delaminationen, zu verhindern, da sie in der Versagenskette an erster Stelle stehen. Dies muss bei der Wahl der Schlagschutzarten beachtet werden, mit welchen die Versuche durchgeführt werden sollen. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, die Wirkung von artfremden Fasern, wie Aramidfasern, auf die Impacteigenschaften zu untersuchen. Faserbrüche treten im Versagensprozess bei einem Einschlag in der Regel erst nach Matrixbrüchen und Delamination auf und sind oft von außen zu erkennen, da sie meistens direkt unter dem Impactor, durch lokale Spannungen oder auf der abgewandten Seite, durch Biegespannungen, entstehen. So wird sich in der Arbeit auf die Modifikation der Matrix und das Einfügen interlaminarer Zwischenschichten beschränkt.

Bei den Matrixmodifikatoren fiel die Wahl auf DuoMod® 5045. Dies ist ein vorvernetzter Nitrilkautschuk in Pulverform, mit einer Carboxylgruppe als funktioneller Gruppe. Die Partikelgröße beläuft sich im Schnitt auf ca. 50µm. Die Partikel zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich durch ihre Carboxylgruppen und die sehr feine Pulverform besser in das Epoxidharz integrieren als andere normale Elastomer- oder Thermoplastpartikel und so die Haftung zwischen den laminaren Schichten verbessern. Konventionelle Partikel sind hierbei eher nachteilig. Auch die Zähigkeit der Struktur und thermische Beständigkeit sollen mit DuoMod® 5045 besser sein als mit konventionellen Partikeln. Getestet werden Proben mit einem Massenanteil von 6% DuoMod® 5045 im Epoxidharz. Dieser Wert wird vom Hersteller empfohlen. [Anlagen, DuoMod® DP5045 Präsentation]

Bei den interlaminaren Zwischenschichten sollen zwei unterschiedliche Materialien getestet werden. Einmal soll die Wirkung von EPDM-Schichten untersucht werden, da es bereits in vielen Branchen zum Einsatz kommt. In den Vorversuchen werden Kraibon®-Lagen von 0,35mm und 0,5mm getestet, bevor eine Auswahl für die Impacttests getroffen werden kann. Die zweite zu testende Art von Zwischenschichten ist das Einfügen von Folien. Dazu sollen wie in [15] biaxial orientierte Polyester-Folien verwendet werden. Diese Folien weisen eine hohe Zugfestigkeit auf und sind chemisch, mechanisch und thermisch sehr stabil. [30] Verwendet werden Folien der Firma Hostaphan. Im Gegensatz zu [15] soll allerdings keine Energie durch Delamination absorbiert werden, sondern die Folien sollen möglichst weiter die Verbindung zum Verbund erhalten. Aus diesen Gründen kommen 50µm- und nicht 26µm starke Folien wie in [15] zum Einsatz. Bei größeren Foliendicken ist darüber hinaus eine höhere dämpfende Wirkung zu erwarten. Des Weiteren sollen nicht so viele Schichten verarbeitet werden wie in [15], da diese die Delamination

nur fördern. Im ILS-Test soll getestet werden, wie die Folienanzahl die interlaminaire Scherfestigkeit beeinflusst. Untersucht wird außerdem, ob das Lochen oder Anrauen der Folien einen positiven Effekt auf die Anbindung der Folien ausübt. Anschließend können Aussagen getroffen werden, welche Konfigurationen für die Impacttests verwendet werden.

In Tabelle 2 ist der Versuchsplan für die Vorversuche abgebildet. Die Namen für die Probenarten ergeben sich durch die verwendeten Schlagschutzkonzepte.

**Tabelle 2: Versuchsplan Vorversuche**

Probenart	Schlagschutz	Besonderheiten	Schlagschutz- menge	Mikroskopproben Vorversuche	Proben zur Bestimmung des Faservolumengehalt	Proben ILS-Test
OS	-	-	-	1	1	6
Duo	DuoMod®	-	6% Partikelgehalt	1	1	6
E035	Kraibon® (0,35mm)	-	2 Lagen	1	1	6
E05	Kraibon® (0,5mm)	-	2 Lagen	1	1	6
P2N	PET-Folie (50µm)	-	2 Lagen	1	1	6
P4N	PET-Folie (50µm)	-	4 Lagen	1	1	6
P2R	PET-Folie (50µm)	angeraut	2 Lagen	1	1	6
P4R	PET-Folie (50µm)	angeraut	4 Lagen	1	1	6
P2L	PET-Folie (50µm)	gelocht	2 Lagen	1	1	6
P4L	PET-Folie (50µm)	gelocht	4 Lagen	1	1	6

## 5.2 Definition und Herstellung der Vorversuchs-Probekörper

Die Probekörper sind Platten, die durch Handlaminare gefertigt (Abbildung 23) und anschließend in einer Presse bei 120°C für 60 min gepresst wurden. Die Probendicke richtete sich dabei nach dem ILS-Test und dementsprechend wurden sie auf 2mm gepresst. Das Harz wurde anschließend Schichtweise mit einer Rolle aufgetragen und mit einer Entlüftungsrolle zwischenentlüftet. Nach dem Auflegen der Deckfolie wurden anschließend Luftblasen ausgerollt.



**Abbildung 23: Probenherstellung durch Handlaminieren**

Das verwendete Faserhalbzeug ist ein Kohlefasergewebe aus HT-Fasern mit einem Flächengewicht von 245g/m<sup>2</sup> und einer Faserorientierung von 0°/90°. Als Matrix wurde das Harz RIM935 mit dem Härter RIMH 936 (Mischverhältnis 100:29 Massenanteile) verwendet.

Bei dem Faservolumengehalt wurde mit einem Faservolumengehalt von 50% kalkuliert, da mit Geweben in der Regel nicht so hohe Faservolumengehalte zu realisieren sind wie mit UD-Schichten oder Gelegen. Der gewünschte Faservolumengehalt lässt sich aufgrund der vorhandenen Flächengewichte nicht immer exakt realisieren, weshalb es an dieser Stelle zu leichten Abweichungen kommen kann. Die Lagenanzahl kann mit der Formel 4 errechnet werden.

Bei den Proben mit Zwischenschichten, also mit Kraibon® und PET-Folien, werden die Solldicken entsprechend angepasst. Da nicht bekannt war, ob die Zwischenschichten ihre Dicke behalten oder unter der hohen Temperatur und dem Druck ihre Form verändern, wird mit den ursprünglichen Schichtdicken gerechnet. Bei Proben mit 2 PET-Folien und jeweils 50µm Dicke ist so z.B. mit einer Solldicke von 1,9mm zu rechnen. Es ergeben sich dementsprechend, für die unterschiedlichen Probenarten und Schlagschutzkonfigurationen, die in Tabelle 3 dargestellten Lagenaufbauten.

**Tabelle 3: Lagenaufbau ILS-Proben**

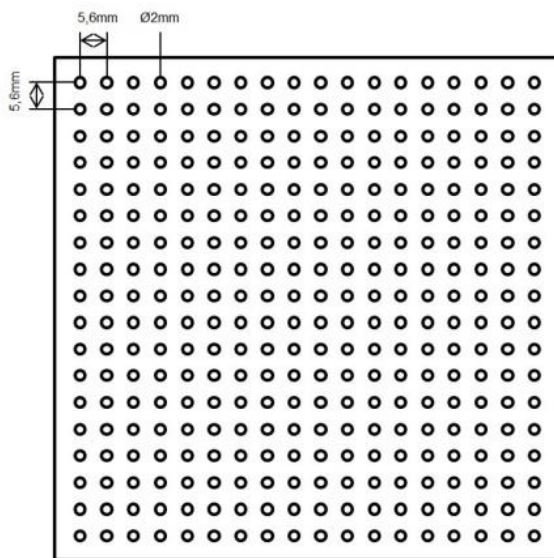
<b>Probenart</b>	<b>Probenaufbau</b>	<b>Faservolumengehalt (theoretisch) in %</b>
OS	(0/90) <sub>7</sub>	47,60
Duo	(0/90) <sub>7</sub>	47,60
E035	((0/90)/EPDM/(0/90) <sub>3</sub> /EPDM/(0/90))	52,35
E05	((0/90)/EPDM/(0/90) <sub>2</sub> /EPDM/(0/90))	54,44
P2N	((0/90)/PET/(0/90) <sub>5</sub> /PET/(0/90))	50,15
P4N	((0/90)/PET/(0/90)/PET/(0/90) <sub>3</sub> /PET/(0/90)/PET/(0/90))	52,93
P2L	((0/90)/PET/(0/90) <sub>5</sub> /PET/(0/90))	50,15
P4L	((0/90)/PET/(0/90)/PET/(0/90) <sub>3</sub> /PET/(0/90)/PET/(0/90))	52,93
P2R	((0/90)/PET/(0/90) <sub>5</sub> /PET/(0/90))	50,15
P4R	((0/90)/PET/(0/90)/PET/(0/90) <sub>3</sub> /PET/(0/90)/PET/(0/90))	52,93

Bei der Herstellung der Proben mit DuoMod® 5045 ist darauf zu achten, dass die DuoMod®-Partikel 6h bei Raumtemperatur und unter geringer Scherwirkung im Harz un-

tergemischt werden, ehe das Harz verarbeitet werden kann. Außerdem ist empfohlen, dem Harz vor dem Mischen noch 0,25% Massenanteile an Triphenylphosphine zuzufügen, welches die Reaktion zwischen Harz und Elastomer beim Vermischen aktivieren soll.

Die EPDM-Lagen benötigen keine besonderen Vorkehrungen bei der Bearbeitung. Sie werden wie Faserlagen im Laminat verarbeitet und lassen sich gut drapieren. Wichtig ist nur, dass die Lagen mindestens 110°C benötigen, damit die Vulkanisation stattfindet und Kraibon® vollständig vernetzen kann. Aus diesem Grund werden alle Proben bei 120°C gepresst, da sie unter gleichen Bedingungen gefertigt werden sollen.

Die PET-Folien werden ebenfalls, wie Faserlagen, im Laminat verarbeitet. Für das Lochen der Folie wurde ein Locheisen mit 2mm Lochdurchmesser verwendet. Die Anzahl und die Abstände der Löcher wurden so gewählt, dass sie gleichmäßig verteilt wurden und eine interlaminare Kontaktfläche von 10% vorliegt. (Abbildung 24) Für das Anrauen der Folien sollte zuerst getestet werden, welche Sandpapierkörnung am geeignetsten ist. Getestet wurden 60er, 120er-, 180er- und 240er-Körnungen. (Abbildung 25 von links nach rechts))



**Abbildung 24: Lochmuster der Folien**



**Abbildung 25: Test Körnung Sandpapier**

Da die Oberfläche so gut wie möglich angeraut werden sollte, um die bestmögliche Vergrößerung der Oberfläche zu erzielen, sollte die Körnung so grob wie möglich sein. Das Sandpapier mit einer 120er Körnung hat sich als am besten geeignet erwiesen. Die Folieneroberfläche ist hierbei rauer als bei der 180er und 240er Körnung. Die 60er Körnung wies zwar die größte Anrauhung der Oberfläche auf, jedoch sind dabei in der Folie vermehrt kleine Löcher entstanden, was jedoch bei dieser Schlagschutzart nicht erwünscht war und zudem kein gleichmäßiges Lochmuster entstanden ist. Die verwendeten Folien wurden anschließend mit dem Sandpapier beidseitig und auf jeder Seite jeweils in zwei Richtungen (0°- und 90°-Richtung) angeraut.

Die Zwischenschichten wurden im Laminat recht weit außen platziert, da bei einem Impact an dünnen Strukturen auf der Zugseite hohe Zug-Biegespannungen entstehen, welche zu Matrixbrüchen führen können. Die Zwischenschichten sollen genau diese Spannungen abbauen und so einen Matrixschaden verhindern. Um den symmetrischen Lagenaufbau zu erhalten, wurden die Zwischenschichten ebenfalls symmetrisch im Laminat verarbeitet und sind deshalb auf der Einschlagseite verarbeitet, was dazu führt, dass auf dieser Seite eine Dämpfung entsteht und so Matrixbrüchen direkt unter dem Impactor entgegen gewirkt werden soll.

Die Proben für den ILS-Test, die Mikroskop-Proben und die Proben zur Faservolumengehaltbestimmung werden per Wasserstrahlschneiden aus der gefertigten Platte geschnitten, da Wasserstrahlschneiden exakter ist als das Sägen der Proben. Darüber hinaus sind die Schnittflächen sauberer.

## 5.3 Bestimmung der Probenqualität

Vor dem ILS-Test wurden die Proben auf ihre Qualifizierung hinsichtlich der Probenqualität untersucht.

### 5.3.1 Bestimmung des Fehlergehalts

Bei der Bestimmung des Fehlergehalts wurden von jeder Probe 4 zufällige Bereiche unter dem Mikroskop aufgenommen, die mittels ImageJ auf ihren Fehlergehalt hin untersucht wurden. Die ermittelten Ergebnisse sind in Abbildung 26 dargestellt.

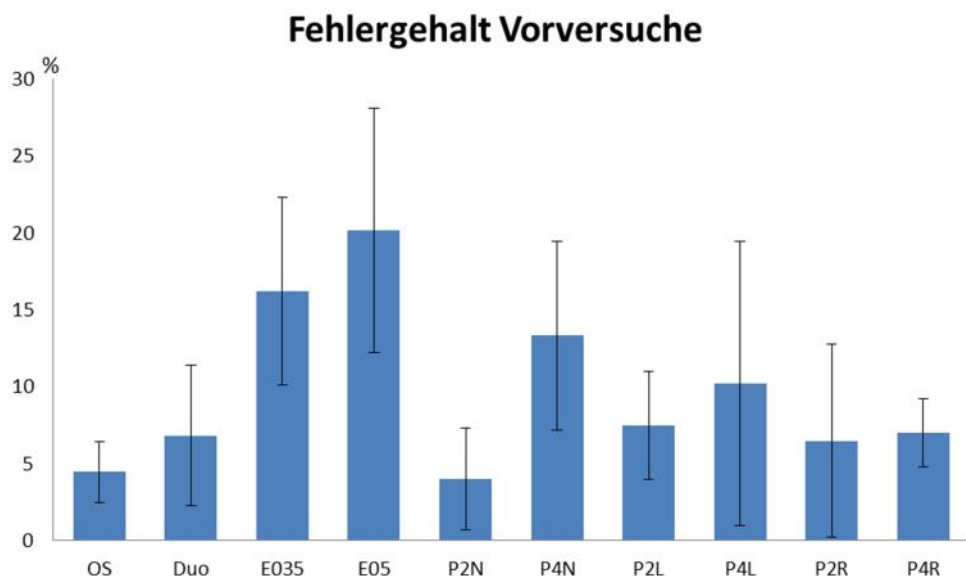
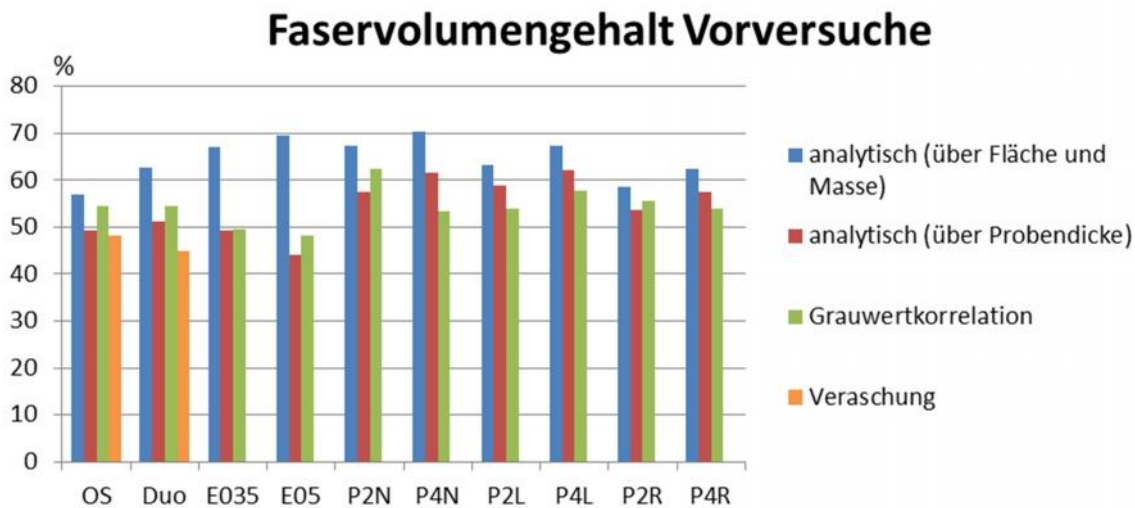


Abbildung 26: Fehlergehalt Vorversuchsproben

Es fällt auf, dass die beiden Proben mit Kraibon®-Lagen den höchsten Fehlergehalt haben. Bei den Proben mit 0,35mm Kraibon®-Schichten sind es ca. 16% und bei den 0,5mm-Schichten sogar ca. 20%. Mit Ausnahme der Proben mit 4 normalen PET-Lagen besitzen alle Proben einen Fehlergehalt von 10%, oder weniger. Die niedrigsten Fehlergehalte weisen dabei die Proben ohne Schlagschutz und die Probe mit 2 normalen PET-Lagen auf. Die Standardabweichung ist bei einigen Proben jedoch ziemlich hoch, was für hohe Schwankungen bei den gemessenen Fehlergehalten spricht. Am höchsten ist die Standardabweichung bei Proben mit 4 gelochten PET-Lagen, bei diesen liegt eine Standardabweichung von 9,2% vor. Die prozentual höchste Schwankung liegt bei Proben mit 2 angerauten PET-Folien vor, bei einer Standardabweichung, die 96,6% des mittleren Fehlergehaltes entspricht. Bei den Proben ohne Schlagschutz ist nicht nur ein geringer Fehlergehalt festgestellt worden, sondern auch die geringste Standardabweichung, mit ca. 2%. Weiterhin ist auffällig, dass mit steigender Anzahl der Fremdlagen der Fehlergehalt, bzw. die Defektdichte deutlich ansteigt.

### 5.3.2 Ermittelte Faservolumengehalte

In Abbildung 27 werden die unterschiedlich ermittelten Faservolumengehalte dargestellt. Dabei wurden die in Abschnitt 2.3. aufgezählten Möglichkeiten zur Faservolumengehaltbestimmung durchgeführt und visualisiert. Die Veraschung der Proben wurde mit 460°C durchgeführt.



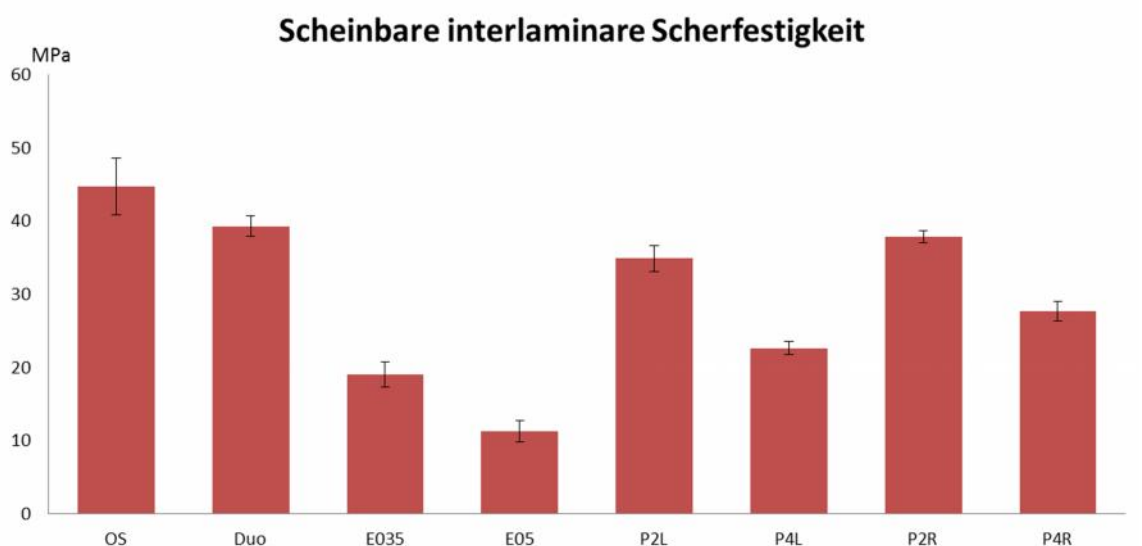
**Abbildung 27: Faservolumengehalt Vorversuche**

Bei den ermittelten Faservolumengehalten fällt auf, dass die analytisch ermittelten Faservolumengehalte bei allen Probenarten am höchsten sind und teils stark von den Ergebnissen der anderen Varianten abweichen. Die größte Abweichung ist bei 0,5mm dicken Kraibon®-Lagen zu beobachten. Während der analytisch ermittelte Faservolumengehalt mit knapp 70% sehr hoch ist, liegt er, sowohl bei dem theoretisch ermittelten Faservolu-

mengehalt (ca.44%), als auch bei dem durch Grauwertkorrelation ermittelten Faservolumengehalt (ca.48%), unter 50%. Die über die Probendicke ermittelten Faservolumengehalte und die über Grauwertkorrelation ausgewerteten Faservolumengehalte sind bei fast allen Proben in ähnlichen Bereichen und weichen, bis auf Proben mit 4 lagen normalem PET (8%), nicht mehr als 5% voneinander ab. Jedoch kann nicht gesagt werden, dass er bei einem Verfahren durchweg höher ist, als bei dem anderen Verfahren. Eine Veraschung wurde nur bei den Proben ohne Schlagschutz und den Proben mit DuoMod®-Partikeln durchgeführt, da nur bei diesen Proben davon ausgegangen werden kann, dass sich die Matrix komplett zersetzt. Mit 48%, bei den Proben ohne Schlagschutz, und 45%, bei den Proben mit den DuoMod®-Partikeln, sind die jeweiligen ermittelten Faservolumengehalte die niedrigsten Werte, die bei den Proben ohne Schlagschutz und mit DuoMod®-Partikeln ermittelt wurden.

## 5.4 Ergebnisse ILS-Test

Die scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeiten, die im ILS-Test ermittelt wurden, sind in Abbildung 28 dargestellt. Bei den Proben mit unbearbeiteter PET-Folie wurde auf einen ILS-Test verzichtet, da sich die Decklagen bei den meisten Proben bereits vor dem Test teilweise oder komplett abgelöst haben, was diese Probenart als Schlagschutz ausschließt. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass die durchschnittliche Probendicke der ILS-Proben 1,86mm beträgt und somit nicht der Solldicke von 2mm entspricht. Laut Norm dürfen die Proben jedoch um  $\pm 0,2\text{mm}$  vom Sollwert abweichen, weshalb alle Proben noch für den Test zu verwenden sind.



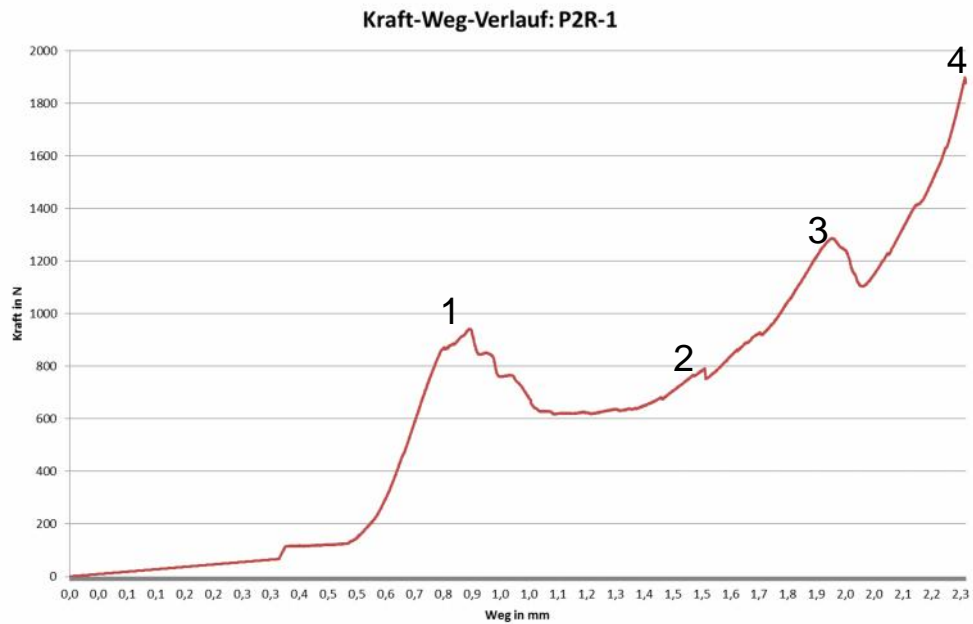
**Abbildung 28: scheinbare interlaminare Scherfestigkeit**

Die Standardabweichung bei allen Probenarten ist relativ gering und dementsprechend weisen alle Proben der gleichen Art ähnliche Ergebnisse auf.

Bei den scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeiten wurden bei den Proben ohne interlaminare Zwischenschicht die höchsten Werte gemessen, während die niedrigsten Werte von den Proben mit Kraibon® aufgezeigt werden. Die Proben ohne Schlagschutz haben, mit 44,7MPa, die höchste scheinbare interlaminare Scherfestigkeit. Am niedrigsten ist sie bei den Proben mit 0,5mm-Kraibon®-Lagen. Sie beträgt 11,3MPa. Bei den Proben mit Folien ist zu sehen, dass die Ergebnisse von gelochten Folien und angerauten Folien in ähnlichen Bereichen liegen. Es ist jedoch klar zu beobachten, dass jeweils die Proben, mit zwei Zwischenlagen eine höhere scheinbare interlaminare Scherfestigkeit aufweisen als die gleichen Probenarten mit 4 Zwischenlagen. So kommen die Proben mit 2 Lagen gelochter PET-Folie (34,9MPa) und die Proben mit 2 Lagen angerauter PET-Folie (37,8MPa) bei der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit recht nah an die Proben mit DuoMod®-Partikeln (39,3MPa) heran.

In Abbildung 29 ist der Verlauf des ILS-Tests am Beispiel der Probe P2R-1 dargestellt. An Punkt 1 war ein erstes deutliches Knacken zu vernehmen und die Durchbiegung der Probe wurde sichtbar. Das Knacken deutet auf ein Versagen in der Probe hin. Da an diesem Punkt keine äußeren Schäden zu beobachten sind, deutet dies auf ein Scherversagen hin. Im Fall der Proben mit den Folien war an Punkt 2 die Delamination der Deckschichten zu beobachten und an Punkt 3 war ein erneutes deutliches Knacken zu vernehmen, was auf ein erneutes Versagen in der Probe hindeutet. Da die Probe zu diesem Punkt bereits stark durchgebogen ist, sind dies Matrixbrüche, Delaminationen und möglicherweise auch Faserbrüche. An Punkt 4 wird die Prüfung nach 2mm Prüfweg beendet, obwohl noch kein Maximum erreicht war. Dass die Proben durch die Biegefinne und die Auflager eingeklemmt wurden, erklärt dabei den bleibenden Kraftanstieg. Der Prüfweg sowie der Lastabfall hätten dementsprechend geringer gewählt werden müssen. Der für die Prüfung relevante Wert ist das Erreichen des ersten Maximums. Da ein eingestellter Lastabfall von 40% zu hoch ist und dieser noch nicht erreicht war lief die Prüfung an diesem Punkt noch weiter. Dies wurde durch nachträgliches Testen von jeweils 2 weiteren Proben jeder Probenart bestätigt. In den nachträglich getesteten Proben lag beim ersten zu beobachtenden Abfall der Kraft kein unerwünschtes Schadverhalten vor. [4] S.377 Somit beziehen sich die interlaminaren Scherfestigkeiten in der Abbildung 31 jeweils auf den Punkt, an dem der erste Abfall der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit zu beobachten ist.

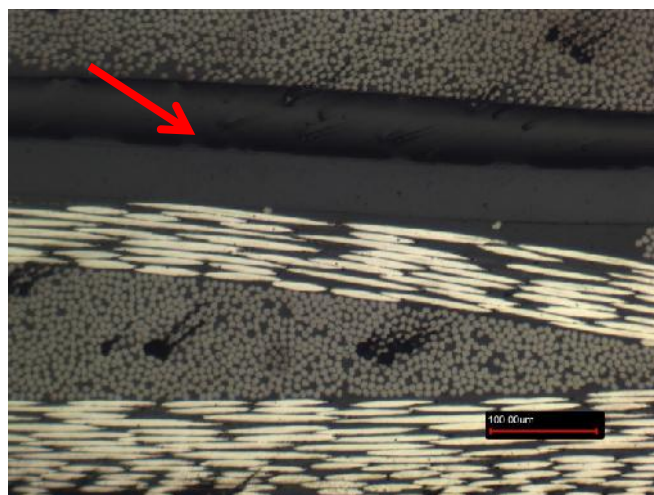




**Abbildung 29: Verlauf Kraftkurve ILS-Test (Bsp.: P2R-1)**

## 5.5 Weitere Beobachtungen

Weitere Auffälligkeiten gab es vor allem bei dem Mikroskopieren der Proben vor dem ILS-Test. So ist bei den Proben mit unbehandelten PET-Folien bereits unter dem Mikroskop eine Ablösung der Lagen zu sehen. (Abbildung 30) Bei allen anderen Zwischenschichten, also sowohl bei den PET-Folien mit Löchern, als auch bei den angerauten Folien und den Laminaten mit Kraibon®-Schichten, ist jedoch keine Ablösung zu beobachten und die Anbindung noch komplett gegeben.



**Abbildung 30: Ablösung der Deckschichten bei P2N**

Des Weiteren wurde unter dem Mikroskop noch die Dicke der PET-Folien und der Kraibon®-Lagen gemessen, um zu schauen, ob die Schichtdicken beim Pressen erhalten bleiben oder abnehmen. Während bei den Versuchsproben mit PET-Folie die Schichtdicke der Zwischenschichten erhalten bleibt, ist bei den Proben mit EPDM-Schicht eine Verringerung zu beobachten. Die Lagen mit einer Ausgangsstärke von 0,35mm hatten nach dem Pressen noch eine durchschnittliche Restdicke von 0,22mm und die Lagen mit einer Ausgangsdicke von 0,5mm hatten noch eine Restdicke von 0,31mm. Diese Werte entsprechen jeweils einer um ca. 36% reduzierten Schichtdicke. (Abbildung 31)

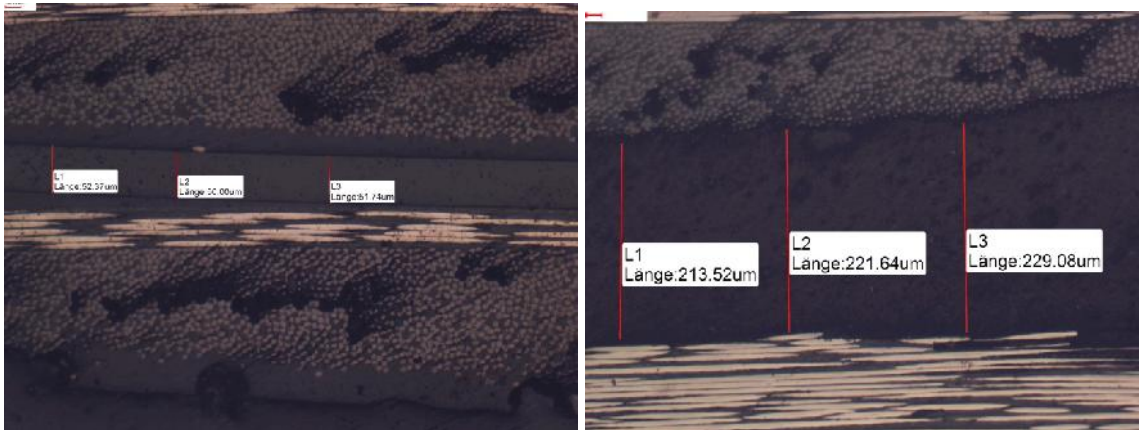


Abbildung 31: Schichtdicken nach dem Pressen PET (li.), Kraibon®(re.)

## 5.6 Diskussion der Vorversuchsergebnisse

Bei den ermittelten Fehlergehalten muss erwähnt werden, dass diese nur eine Stichprobe des ganzen Laminats darstellen. Es wurde lediglich ein Querschnitt von 20mm Länge unter dem Mikroskop betrachtet. Damit lassen die Ergebnisse keine endgültigen Schlüsse über den Fehlergehalt in der Struktur zu, sondern sollen nur eine grobe Orientierung zum Vergleichen der unterschiedlichen Laminataufbauten geben. Somit lassen sich die großen Standartabweichungen erklären, die in der geringen Stichprobenzahl begründet sind. Mit einer größer werdenden Stichprobe kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse annähernd normalverteilt sind. Bei mehreren getesteten Querschnitten würden diese wahrscheinlich nicht mehr in dieser Form vorliegen.

Zu erwarten war bei den Ergebnissen, dass die Struktur ohne Schlagkonzepte den niedrigsten Fehlergehalt erzielt, da sowohl die Zwischenschichten, als auch die DuoMod®-Partikel, in gewisser Weise Fremdkörper sind, die den Fehlergehalt beeinflussen würden. Die Zwischenschichten wirken wie Sperrschichten, die das Entweichen von Luft oder Gasen erschweren, bzw. quer zur Struktur unmöglich machen. Den niedrigsten Fehlergehalt weist allerdings die Probe mit zwei unbehandelten PET-Folien auf, was aufgrund der geringen Stichprobenmenge nur ein Zufall sein kann. Darüber hinaus weisen die Proben, die jeweils eine höhere Lagenanzahl an Zwischenschichten besitzen, einen höheren Fehler-

gehalt auf. So ist bei allen Folienarten zu beobachten, dass mit 4 Lagen jeweils mehr Fehler enthalten sind als mit 2 Lagen. So ist die Ursache, dass die Zwischenschichten wie Sperrschichten wirken und ein Entweichen der Gase nur noch seitlich möglich ist. Jedoch müssen die Gase so einen längeren Weg zurücklegen, um die Struktur zu verlassen. Mehrere Zwischenschichten verschärfen dieses Problem zusätzlich. Der hohe Fehlergehalt der Proben mit Kraibon® lässt sich möglicherweise erneut über die geringe Stichprobenzahl erklären, so dass durch Zufall Bereiche ausgewertet wurden, die einen relativ hohen Fehlergehalt aufweisen. Um genauere Aussagen dazu treffen zu können, müsste der Einfluss der EPDM-Schichten auf den Fehlergehalt genauer untersucht werden.

Bei den ermittelten Faservolumengehalten ist aufgefallen, dass die analytisch ermittelten Werte immer am höchsten sind, teilweise sogar deutlich höher als bei den anderen Prüfmethoden. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in diesem Verfahren nicht der Porengehalt im Laminat berücksichtigt wird. So ist zu sehen, dass bei den Probenarten mit einem hohen Fehlergehalt die Abweichung zwischen analytischem Verfahren und den restlichen Verfahren am höchsten ist. Hohe Porengehalte führen zu einer Abnahme der Matrixmasse und somit zu einem höheren Fasermasseanteil. Da bei der Berechnung im analytischen Verfahren nicht die Probendicke berücksichtigt wird, führt dies zu hohen Werten beim Faservolumengehalt. Des Weiteren muss bei diesem Verfahren die Matrixdichte bekannt sein. Bei der Probe aus Matrix und DuoMod®-Partikeln war dies allerdings nicht möglich, da bei der Aushärtung Gase gebildet wurden, die nicht entweichen konnten und somit ein sehr hoher Porengehalt in der Probe vorliegt, der ein Ermitteln der Dichte verhindert. (Abbildung 32)



**Abbildung 32: Porenbildung Matrix mit DuoMod®-Partikeln**

Auch bei den Proben mit Kraibon® kann keine gesicherte Aussage zu den ermittelten analytischen Faservolumengehalten getroffen werden. Da die Schichtdicke beim Pressen scheinbar abzunehmen scheint, ist die Frage, inwiefern sich damit das Flächengewicht der Schichten ändert. Möglicherweise wird das EPDM seitlich aus der Probe gedrückt,

was eine Abnahme des Flächengewichts zur Folge hätte. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob sich das Flächengewicht dadurch direkt proportional zur Schichtdicke verändert oder ob sich mit der Vulkanisation die Dichte ändert. Aus all diesen Gründen lässt sich sagen, dass dieses Verfahren zur Faservolumengehaltbestimmung nicht geeignet ist. Das Verfahren, bei dem mittels Grauwertkorrelation der Faservolumengehalt ermittelt wurde, ist ebenso nur bedingt geeignet, da sich hierbei wieder nur auf einzelne Querschnitte bezogen wurde, die nicht repräsentativ für die ganze Struktur sind und Fehler nicht berücksichtigt werden. Die Veraschung ist zwar das genaueste Verfahren, da jedoch keine gesicherte Aussage getroffen werden kann, wie die Zwischenschichten das Ergebnis beeinflussen, kommt dieses Verfahren nicht weiter zur Anwendung. Dementsprechend ist das analytische Verfahren, bei dem der theoretische Faservolumenanteil über die Probendicke berechnet wird, in diesem Falle am besten geeignet, da das Flächengewicht der Fasern bekannt ist, Fehlergehalt und Matrixdichte keine Rolle spielen und die Dicken der Zwischenschichten zwar berücksichtigt werden müssen, diese jedoch unter dem Mikroskop gemessen werden können. Die theoretisch errechneten Faservolumengehalte befinden sich zwischen 44% und 62%, somit kann gesagt werden, dass sich alle Proben in noch akzeptablen Bereichen befinden, bei den Proben mit einem Faservolumengehalt von über 60% jedoch die Wahrscheinlichkeit für Trockenstellen höher ist, als bei den anderen Proben. Die etwas geringeren Faservolumengehalte bei den Proben mit Kraibon® lassen sich so erklären, dass bei der Auslegung der Proben mit den jeweiligen Ausgangsschichtdicken von 0,35mm und 0,5mm gerechnet wurde. Da beide Lagendicken durch den Pressvorgang abgenommen haben, ist der Faservolumengehalt gesunken. Die hohen Faservolumengehalte bei den Proben mit PET-Folien lassen sich so erklären, dass die gleichen Anzahl an Faserlagen wie bei den Proben ohne Schlagschutz zum Einsatz kamen und bei gleichbleibender Probendicke noch zusätzlich die Folien eingefügt wurden.

Bei den ILS-Versuchen sind die in Abbildung 33 dargestellten Fehlerarten aufgetreten.



**Abbildung 33: Aufgetretene Versagensarten**

Links im Bild ist ein Abblättern der äußeren Schichten zu sehen. Dieses Abblättern ist durch das Schubversagen entstanden, was heißt, dass in diesem Falle das nach ILS-Norm gewünschte Versagensverhalten aufgetreten ist. Im mittleren Bild ist ein Versagen durch Zug zu sehen sowie Quetschungen, die durch Druck hervorgerufen werden. Im rechten Bild wiederum ist ein Versagen durch Zug und durch Scherung zu beobachten. Die im mittleren und im rechten Bild aufgezeigten Fehlerarten sind somit keine erwünschten Fehlerarten und können demnach nur innerhalb einer Versuchsreihe und mit demselben Werkstoff verglichen werden. So sind die unerwünschten Schadensarten u.a. dadurch entstanden, dass die Proben aufgrund des geringen Auflagerabstands, bei ver-

gleichsweise hohem Biegeinnenradius, zwischen Auflagern und Biegefinne eingeklemmt wurden, bzw. durch eine zu hohe Durchbiegung.

Dass bei den Proben ohne Schlagschutz und mit DuoMod®-Partikeln die Scherfestigkeit am höchsten ist, liegt daran, dass die Zwischenschichten die Anbindung negativ beeinflussen. Die Schichten trennen die Struktur und bieten aufgrund ihrer glatten Oberfläche eine schlechtere Haftung zur Matrix. Dementsprechend bedeutet eine höhere Anzahl an Zwischenschichten eine geringere interlaminare Scherfestigkeit. Die geringen Werte bei der Scherfestigkeit der Proben mit Kraibon® lassen sich durch die geringere Faserlagenanzahl erklären, welche zu einer geringeren Steifigkeit der Proben führen. Somit ist der Wert nicht bei allen Proben mit Kraibon® der Wert für die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit, da nicht bei allen Proben Scherversagen auftritt, sondern einige Proben lediglich Zugversagen oder Mischbrüche aufzeigen. Der Verlauf der Diagramme der Proben ohne Schlagschutz und mit DuoMod®-Partikeln lässt darauf schließen, dass beim Erreichen des ersten Maximums tatsächlich ein Scherversagen vorliegt, während bei den Proben mit Folien der Diagrammverlauf bei einigen Proben auf Scherversagen hindeutet, bei anderen wiederum auf einen Mischbruch. [4] S.377

## 5.7 Auswahl der Schlagschutzkonzepte für den Impacttest

Für die Auswahl der Schlagschutzarten der Impactversuche bedeutet dies, dass die DuoMod®-Partikel in den Vorversuchen keine gravierenden negativen Ergebnisse aufgewiesen haben und deshalb in den Impactversuchen mit einem Massegehalt von 6% zum Einsatz kommen. Auch mit Kraibon® werden Impacttests durchgeführt, da das Ergebnis im ILS-Test zwar nicht mit den anderen Proben verglichen, jedoch auch kein Scherversagen festgestellt werden konnte. In den Impactproben werden jeweils 2 0,35mm dicke Lagen verarbeitet. Da die Impactproben mit 3mm relativ dünn sind, wird die dünnere Kraibon®-Schicht verwendet. Bei den Folien werden Impactproben mit 4 Lagen angerauter Folie durchgeführt. Die Werte für die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit waren bei gelochten und angerauten Folien ähnlich, was für eine ähnlich gute Anbindung spricht. Da die zu erwartende dämpfende Wirkung jedoch bei den nicht gelochten Folien höher ist, fällt die Wahl auf die angerauten Folien. Da die Folien lediglich 50µm stark sind, werden, bei einer Probendicke von 3mm, 4 Folien statt 2 Folien verarbeitet. Für die Impacttests ergibt sich somit der in Tabelle 4 abgebildete Versuchsplan.

**Tabelle 4: Versuchsplan Impacttest und anschließende Untersuchungen**

Probenart	Impactproben	Mikroskop-Proben (Post-Impact)	Ultraschallprüfung
OS	4	2	2
Duo	4	2	2
E035	4	2	2
P4R	4	2	2





## 6 Versuchdefinition des Impacttests

### 6.1 Impactvorrichtung

Bei der Impactvorrichtung handelt es sich um einen Fallturm, bei dem der Impactor gezielt auf die Versuchsprobe fallen gelassen wird. Die Probe ist dabei in einer Probenaufnahme eingespannt. Damit nach dem ersten Impact nicht noch weitere Impacts passieren, ist eine Anti-Rebound-Vorrichtung nötig, die den Impactor nach dem ersten Aufprall abfängt. In diesem Fall wurde dies durch ein Aluminiumprofil realisiert, dass nach dem ersten Impact untergeschoben wurde. Die Fallhöhe wird bei dieser Vorrichtung über die potenzielle Energie berechnet. Hierzu ist es nötig, vorher das Gewicht des Impactors zu bestimmen.

#### 6.1.1 Auswahl der Impactor-Geometrie

Bei der Impactor-Geometrie handelt es sich um eine stumpfe, runde Geometrie. Es wurde sich für diese Geometrie entschieden, da bei spitzeren Geometrien die Wahrscheinlichkeit für oberflächliche Schäden höher ist und die Struktur eher dazu tendiert, dass die Energie nicht durch die ganze Struktur absorbiert wird, sondern eher lokal. Ziel des Versuches ist es allerdings, eher innere Schäden zu generieren und dafür ist eine stumpfe Geometrie besser geeignet, wie in Abbildung 34 (rechts) zu sehen ist.



Abbildung 34: Impactvorrichtung (li.) und Impactor-Geometrie (re.)

Bei der Bestimmung des Impactor-Durchmessers muss berücksichtigt werden, welche Einflüsse der Impact auf die Ränder der Impact-Probe hat. So kann ein zu großer Durchmesser dazu führen, dass es zu Ablösungen, bzw. Delaminationen, im Randbereich der Proben kommt, was zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen würde. Dabei ist zu beachten ob der Rand frei ist oder durch anliegende Formen, als geschlossen betrachtet werden kann. Die Proben in dieser Arbeit haben freie Ränder, was zu einer Begrenzung des Impactor-Durchmessers führt. Dabei wird vom schlimmsten Fall ausgegangen, was in diesem Falle eine Penetration des Impactors wäre. Der Impactor wirkt unter diesen Umständen wie ein Insert, das in die Struktur hinein gedrückt wird. Der Einfluss eines Inserts auf den Rand der Probe kann mit Formel 6 bestimmt werden:[3] S.214-215

**Formel 6**

$$P_{SS}^* = P_{SS} \cdot \eta_{EN}$$

Mit dieser Formel kann die Belastbarkeit eines Inserts berechnet werden, welches einer senkrechten (Normalspannung) Belastung unterliegt, jedoch durch den Kanten-Koeffizienten reduziert wird. Da der Impactor auf die Struktur ebenfalls eine Normalenbelastung ausübt, kann mit der Formel 6 der Einfluss des Impactors auf die Probenränder errechnet werden. Der Kanten-Koeffizient gibt dabei an, welchen Einfluss das Insert, bzw. in diesem Fall der Impactor, auf den Rand der Struktur hat. Ein Kanten-Koeffizient der kleiner als 1 ist, reduziert die Belastbarkeit des Inserts und im Falle dieser Arbeit die mögliche Impactenergie. Wird diese maximale Belastung nicht eingehalten, kommt es zu Delaminationen an den Rändern der Probe. Wenn der Abstand zwischen Impactor-Mitte und Rand der Struktur größer als der 5-fache Impactor-Radius ist, bzw. der Rand geschlossen ist, kann für  $\eta_{EN} = 1$  angenommen werden. Dies hat zur Folge, dass  $P_{SS}^* = P_{SS}$  ist, was gleichbedeutend damit ist, dass das Insert keine Einflüsse auf den Rand hat und somit voll belastbar ist. [3] S.214

Für die Impactor-Geometrie hat dies die Auswirkung, dass bei Probenmaßen von 200mm x 200mm und einem mittigen Impact der minimale Randabstand 100mm beträgt. Dieser muss größer als der 5-fache Radius des Impactors und dementsprechend kleiner als 20mm sein. Ein zu kleiner Impactorradius hätte ein lokales Schadverhalten zur Folge. Wiederum besteht bei einem zu großen Radius, wie 18mm oder 19mm, die Gefahr, dass bei einem Impact der nicht exakt mittig auf der Probe aufschlägt, sondern 1-2mm im Einschlagpunkt abweicht, ein Einfluss des Impacts auf die Ränder der Probe vorliegt. Aus diesen Gründen wurde sich bei der Impactor-Geometrie für einen Radius von 15mm entschieden.

### 6.1.2 Entwicklung der Probenaufnahme

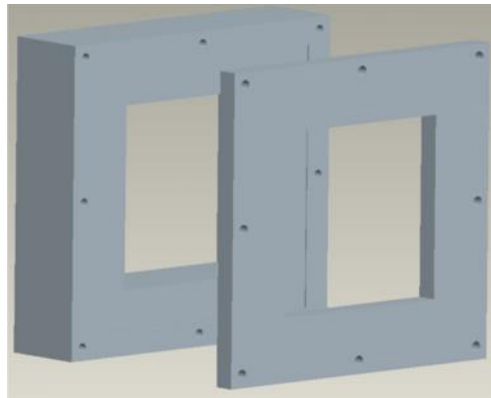
Um Ergebnisse zu erzielen, die das reine Impactverhalten der Proben wiedergeben, müssen bei der Probenaufnahme möglichst alle Randeffekte ausgeschlossen werden. Wichtig ist hierbei, dass die Impactenergie ausschließlich durch die FVK-Struktur absorbiert wird



und nicht durch Verformung der Probenaufnahme. Des Weiteren müssen alle Probe mit der gleichen Kraft und gleichmäßig eingespannt werden, um eine gleichmäßige Energieaufnahme zu ermöglichen. Die Probenaufnahme muss darüber hinaus eine Aussparung oder ähnliches haben, um alle Proben exakt gleich platzieren zu können.

### Konzept 1

Konzept 1 in Abbildung 35 ist der erste Entwurf für eine Probenaufnahme. Dabei handelt es sich um eine Probenaufnahme aus Stahl, in die eine 1mm tiefe Aussparung gefräst wurde, die zur exakten Platzierung der Versuchsproben dient.

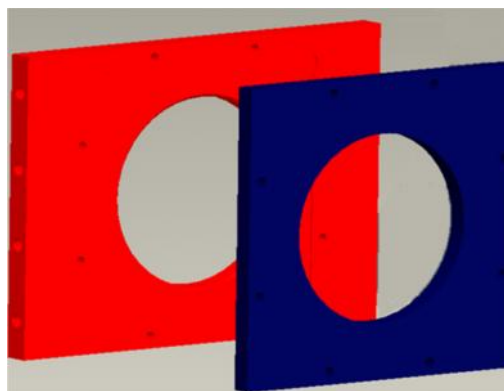


**Abbildung 35: Konzept 1 Probenaufnahme**

Eingespannt werden die Proben über einen Spanndeckel, der durch 8 Schrauben befestigt wird. In der Probenaufnahme und in dem Spanndeckel befinden sich quadratische Löcher, damit bei dem Impact nur die Struktur die Impactenergie aufnimmt und keine Energie durch eine Rückwand aufgenommen wird.

### Konzept 2

Konzept 2 (Abbildung 36) basiert auf dem ersten Konzept und ist eine Weiterentwicklung der ersten Probenaufnahme. Dieses Konzept stellt das finale Konzept dar, mit dem die Impactversuche stattfinden.



**Abbildung 36: Konzept 2 Probenaufnahme**

Änderungen gab es unter anderem bei der Verspannung der Probe. Die Gewinde für die Schrauben wurden so in der Aufnahme platziert, dass alle Löcher den gleichen Abstand zueinander besitzen und auf einem Kreis liegen, dessen Mittelpunkt der Impactpunkt ist. Diese Anordnung der Schrauben soll eine gleichmäßige Spannungsverteilung und damit eine gleichmäßige Energieabsorption ermöglichen. Zur Verspannung werden Schrauben M8x1.25 mit einer Festigkeitsklasse von 8.8 verwendet. Nach [41] werden die Schrauben mit einem Anzugsmoment von 24,9Nm festgezogen. Des Weiteren sind die Löcher in Aufnahme und Spanndeckel im zweiten Konzept rund. Die runden Löcher sollen, genau wie die kreisförmige Anordnung der Schrauben, zu einer gleichmäßigen Spannungsaufnahme in allen Richtungen führen. Bei dem Lochdurchmesser wurde mit 150mm der 5-fache Impactordurchmesser gewählt. Um das Fräsen der 1mm tiefen Aussparung zu erleichtern, wurden in den Ecken runde Aussparungen konstruiert. Die Maße der Aussparung für die Probe sind 200x200mm. Für eine ideale Steifigkeit der Probenaufnahme ist eine ausreichende Wandstärke zu wählen. Für die Probenaufnahme wurde eine Wandstärke von 20mm gewählt. Die Befestigung der Probenaufnahme an der Impactvorrichtung wird durch 4 M12x1.75 Schrauben realisiert, da an dieser Stelle keine Energie durch die Aufnahme absorbiert werden darf. Die Oberflächen der Probenaufnahme und des Spanndeckels wurden geschlichtet, damit die Oberfläche keine negativen Einflüsse auf die Probenoberfläche ausübt.

## 6.2 Versuchsdurchführung

### 6.2.1 Vorbereitung der Impactversuche

#### 6.2.1.1 Bestimmung der Impactenergie und der Fallhöhe

Zur Bestimmung der Impactenergie wird ein praktisches Beispiel herangezogen. Das praktische Beispiel soll in dem Fall ein Steinschlag durch Gleisschotter an einem Carbon-Drehgestell eines Zuges sein. Der Zug ist eine Erzgebirgsbahn des Typs VT 642 mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120km/h (33,3m/s). [31]

Gleisschotter ist in der Norm DIN EN 13450 genau definiert. [19] Für Gleisschotter gilt, dass seine Oberfläche zu 100% gebrochen ist. Des Weiteren ist die Korngröße durch genaue Grenzen definiert. Diese Grenzen befinden sich bei  $d=31,5\text{mm}$  und  $D=63\text{mm}$ . Damit ergibt sich das größte mögliche Gesteinsvolumen, wenn annähernd von einer Kugel mit einem Radius von 31,5mm ausgegangen wird. (Formel 7) Die Masse errechnet sich nach Formel 8 und das Gestein ist Granit mit einer Dichte von  $2,7\text{g/cm}^3$ .

Formel 7:

$$V_{\text{Stein}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{Stein}}^3$$

$$V_{Stein} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (3,15cm)^3$$

$$V_{Stein} = 130,9cm^3$$

Formel 8:

$$m_{Stein} = \rho_{Granit} \cdot V_{Stein}$$

$$m_{Stein} = 2,7 \frac{g}{cm^3} \cdot 130,9cm^3$$

$$m_{Stein} = 353,5g$$

Die Einschlagenergie errechnet sich anschließend über die kinetische Energie (Formel 9). Dabei wird mit der maximalen Geschwindigkeit der Bahn gerechnet, die 120 km/h ist, was 33,3 m/s entspricht.

Formel 9:

$$E_{Stein} = \frac{1}{2} m v_{Stein}^2$$

$$E_{Stein} = \frac{1}{2} \cdot 0,3535kg \cdot (33,3 \frac{m}{s})^2$$

$$E_{Stein} = 196,39J$$

Da keine genauen Angaben zu Bauteildicken von Carbon-Drehgestellen bekannt sind, wird von Bauteildicken von 30mm ausgegangen. Diese Bauteildicke lässt sich allerdings in den Versuchen schwer realisieren, da es, aufgrund der exothermen Reaktion der Matrix, bei dicken Bauteilen zu einem Wärmestau kommen kann, in dessen Folge die Matrix überhitzt und Verkohlungen auftreten. Darüber hinaus sind solche Proben sehr kostenintensiv. Aus diesen Gründen werden Bauteildicke und Impactenergie herunterskaliert. So ergibt sich für eine Impact-Probendicke von 3mm eine Impactenergie von:

$$E_{Impact} = 19,64J \approx 20J$$

Damit ergibt sich, nach Formel 10 folgende Fallhöhe:

Formel 10:

$$E_{pot} = mgh$$

$$h = \frac{E_{impact}}{mg}$$

$$h = \frac{20J}{4,1985kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 48,56cm$$

### 6.2.1.2 Definition und Herstellung der Impact-Probekörper

Die Herstellung der Impact-Proben und die Herstellungsbedingungen sind die Gleichen wie in Abschnitt 5.2. Die Probendicke ist bei den Impactproben 3mm und die Proben sollen Maße von 200mm x 200mm haben. Bei dem Faservolumengehalt wird wieder mit 50% kalkuliert. Neben dem 245g/m<sup>2</sup> Kohlefasergewebe wird noch 163g/m<sup>2</sup> Kohlefasergewebe verwendet, um in allen Proben eine gleiche Anzahl an Faserlagen zu realisieren. Der Lagenaufbau soll dabei ein quasiisotroper Lagenaufbau sein. Dieser Aufbau sorgt dafür, dass die Struktur in jede Richtung in der Ebene annähernd gleiche Eigenschaften besitzt und so eine gleichmäßige Energieaufnahme im Falle des Impacts ermöglicht. [42] In Abbildung 37 ist zu sehen, dass die Elastizitätsmoduln bei einem quasiisotropen Aufbau unabhängig von der Drehung des Laminats sind.

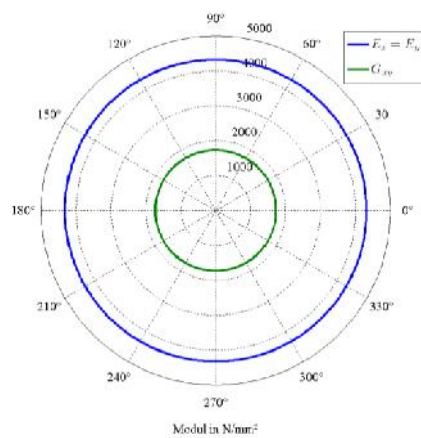


Abbildung 37: Polardiagramm mit E-Moduln eines quasiisotropen Laminats [42]

In Tabelle 5 ist der Lagenaufbau der Versuchsproben für die Impactversuche dargestellt.

Tabelle 5: Lagenaufbau Impactversuche

Probenart	Probenaufbau	Faservolumengehalt (theoretisch) in %
OS	$((0/90)/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45))_s$ (alles Gewebe 245g/m <sup>2</sup> )	54,44
Duo	$((0/90)/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45))_s$ (alles Gewebe 245g/m <sup>2</sup> )	54,44
E035	$((0/90)/EPDM/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45))_s$ $((245\text{g/m}^2)/(344\text{g/m}^2)/(245\text{g/m}^2)_3/(163\text{g/m}^2)_2)_s$	52,35
P4R	$((0/90)/PET/(\pm 45)/PET/(0/90)/(\pm 45)/(0/90)/(\pm 45))_s$ $((245\text{g/m}^2)/(72\text{g/m}^2)/(245\text{g/m}^2)/(72\text{g/m}^2)/(163\text{g/m}^2)_4)_s$	55,17

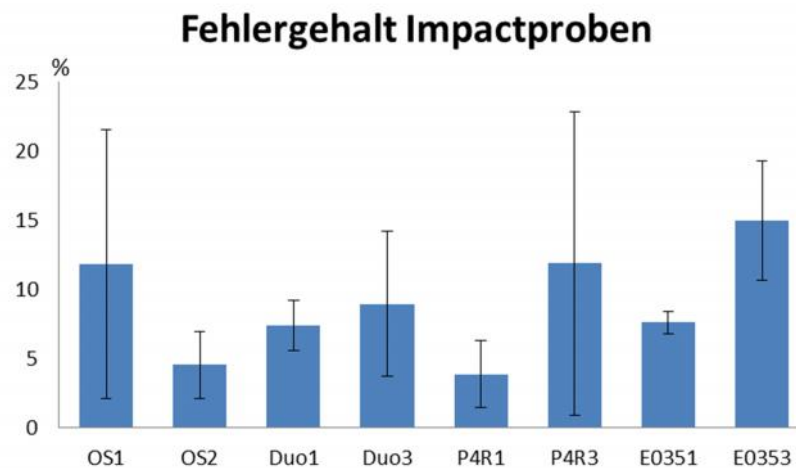
## 7 Ergebnisse und Auswertung

### 7.1 Bestimmung der Impactprobenqualität

Auch die Impactproben wurden vor den eigentlichen Impacttests noch einmal auf ihre Probenqualität hin untersucht. Dazu wurde erneut der Fehlergehalt bestimmt und gleichzeitig unter dem Mikroskop geschaut, ob es weitere Auffälligkeiten gab. Ebenso wurde der Faservolumengehalt noch einmal bestimmt.

#### 7.1.1 Ermittelter Fehlergehalt

Bei den Impactproben wurden wieder 20mm lange Querschnitte der Proben genommen, in Harz eingebettet und unter dem Mikroskop betrachtet. Von insgesamt 16 Impactproben wurde die Hälfte auf ihren Fehlergehalt hin untersucht. Da in einem Pressvorgang immer 2 Proben hergestellt wurden, wurde immer nur eine Probe pro Pressvorgang genommen. Im Diagramm steht die letzte Ziffer bei der Probenbezeichnung lediglich für die Nummer der Probe.



**Abbildung 38: Fehlergehalt Impactproben**

Bei den ermittelten Fehlergehalten (Abbildung 38) liegt kein Wert über 15%. Die Probe E0353 weist mit knapp 15% den höchsten Fehlergehalt auf. Von den anderen Proben liegen nur die Fehlergehalte der Probe OS1 und der Probe P4R3 über einem Fehlergehalt von 10%. Dies sind die beiden Proben, die im Vergleich zu allen anderen Proben mit ca. 10% eine recht hohe Standardabweichung aufweisen. Die restlichen Standardabweichun-

gen liegen alle unter 5%. Der Fehlergehalt bei der Probe P4R1 ist mit knapp 4% der Geringste aller Proben.

Beim Mikroskopieren wurden darüber hinaus die Dicken der Zwischenschichten überprüft. Dabei ist erneut aufgefallen, dass die Schichtdicken der EPDM-Schichten abgenommen haben. Während bei der Probe E0353 beide Kraibon®-Lagen mit 231 $\mu$ m und 230 $\mu$ m eine ähnliche durchschnittliche Schichtdicke aufweisen, sieht es bei der Probe E0351 anders aus: Eine Lage ist durchschnittlich 242 $\mu$ m, die andere 334 $\mu$ m dick. (Abbildung 39) Somit kommt man auf eine Kraibon®-Dicke von 461 $\mu$ m in der Probe E0353 und auf 576 $\mu$ m bei der Probe E0351 und somit auf einen Unterschied von 115 $\mu$ m. Beide Proben weisen jedoch keine gravierenden Unterschiede in ihre Probendicke auf. E0353 ist im Schnitt 3,01mm dick und E0351 im Schnitt 2,99mm, was lediglich einem Unterschied von 20 $\mu$ m entspricht.

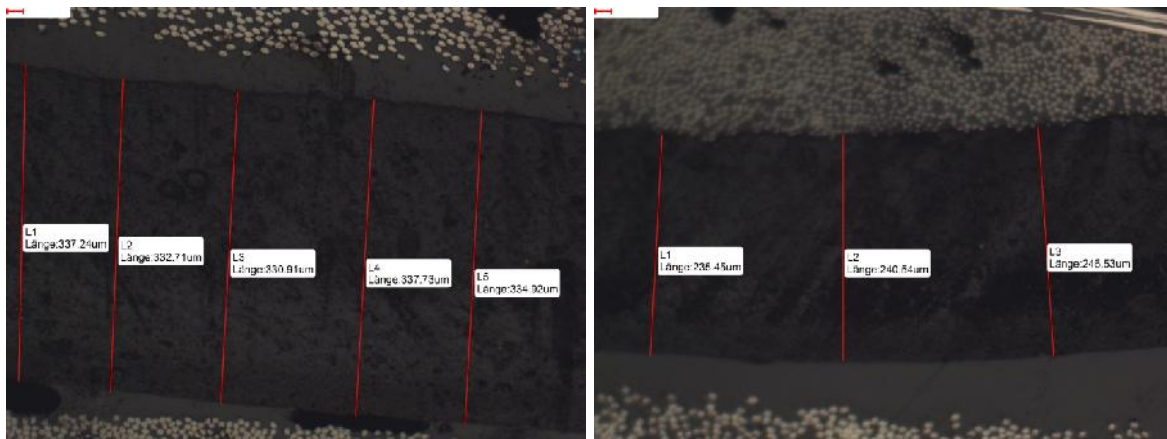


Abbildung 39: EPDM-Schichtdicken E0351

## 7.1.2 Ermittelte Faservolumengehalte

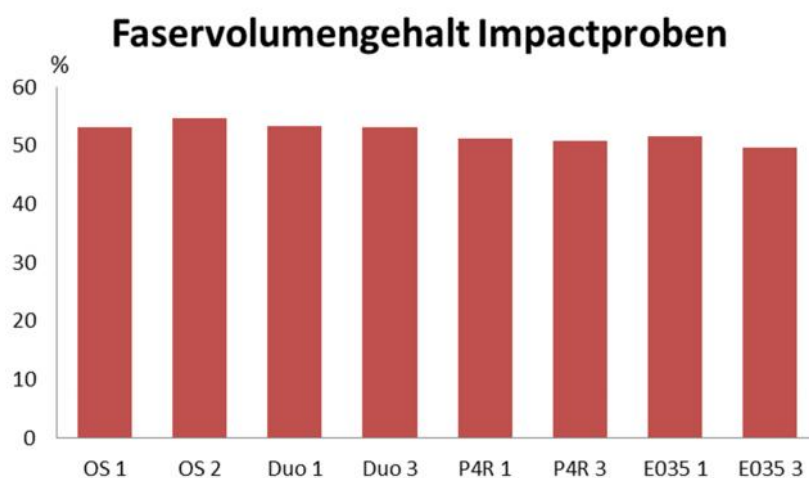


Abbildung 40: Faservolumengehalt

Die Abbildung 40 dargestellten Faservolumengehalte wurden über die analytische Verfahren, mittels real gemessener Probendicke, ermittelt, da sich diese Methode in den Vorversuchen als am besten geeignet herausgestellt hat.

Bei den ermittelten Faservolumengehalten ist zu sehen, dass es keine großen Ausschläge gibt. Der höchste Faservolumengehalt liegt bei OS2 mit 54,6% vor und der Niedrigste bei E0353 mit 49,6%. Somit liegen alle Proben innerhalb von 5%. Die Proben ohne Schlagschutz und die Probe mit DuoMod®-Partikeln weisen alle einen Faservolumengehalt über 53% auf. Bei den Proben P4R1, P4R3 und E0351 beträgt der Faservolumengehalt ca. 51%. Somit ist E0353 die einzige Probe, deren Faservolumengehalt unter 50% liegt.

## 7.2 Äußere Schäden nach den Impactversuchen

Bereits nach den Impacttests konnten erste äußere Schäden festgestellt und beurteilt werden. Alle Proben weisen auf der Impactseite eine leichte Vertiefung auf. (Abbildung 41) Am meisten ausgeprägt sind diese Vertiefungen bei den Proben ohne Schlagschutz. Bei diesen Proben sind an der Oberseite eine leichte Rissbildung und Delaminationen zu beobachten. Die Proben mit Folien und DuoMod®-Partikeln weisen eine geringere Ausprägung der Vertiefungen auf und bei den Proben mit Kraibon® sind die Einschlagstellen bereits kaum noch mit den Händen zu spüren und nur noch schwer zu erkennen. Auf der Zugseite ist bei allen Proben eine größere Schädigung zu beobachten, hauptsächlich durch Rissbildung. (Abbildung 42) In Tabelle 6 sind die Mittelwerte aller Ausmaße der Schädigungen auf der Impactseite und der Schädigungen auf der Zugseite dargestellt:

**Tabelle 6: Maße visuelle sichtbare Schäden**

Probenart	Schadfläche Impactseite		Schadfläche Zugseite	
	X in mm	Y in mm	X in mm	Y in mm
OS	8,5	8,875	21	18,75
P4R	8,875	8,5	24,5	12,25
Duo	8,25	8,75	17,25	14,75
E035	8,5	9,375	7,875	8,375

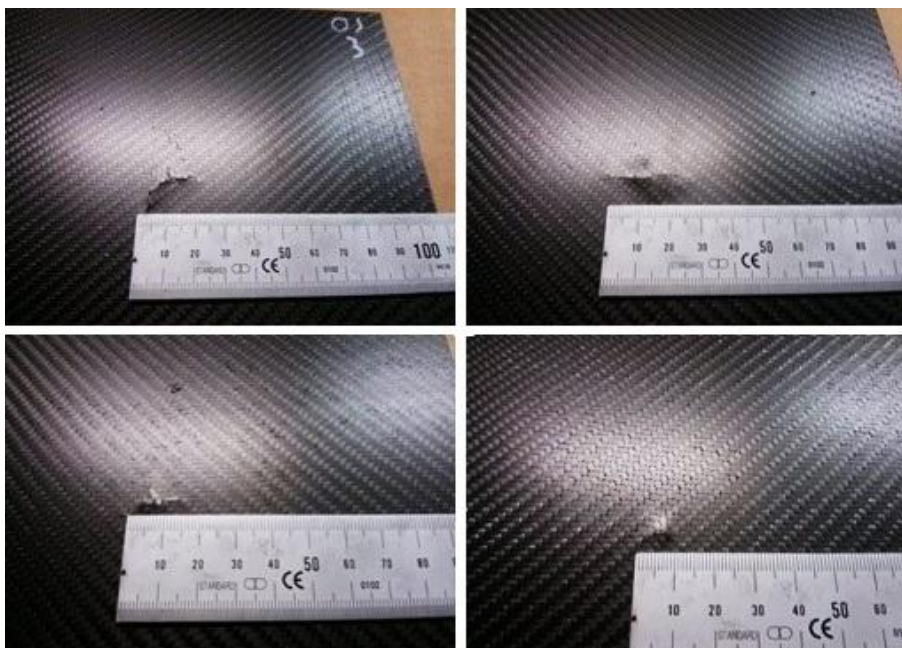
Die Maße der Schadflächen auf der Impactseite haben bei allen Proben, sowohl in x-, als auch in y-Richtung, annähernd die gleiche Ausdehnung, sie unterscheiden sich damit lediglich in der Ausprägung der Eindellungen. Die größte Rissausbreitung ist durchschnittlich bei den Proben ohne Schlagschutz zu sehen, diese sind jedoch unwesentlich größer als die Risse bei den Proben mit PET-Folien. Jedoch sind die Schadflächen auf der Zugseite bei den Proben mit PET-Folie sichtbar ausgebeulter als bei den Proben ohne



Schlagschutz. Wiederum etwas geringer ist die durchschnittliche Rissausdehnung bei den Proben mit DuoMod®-Partikeln, bei welchen keine Ausbeulung zu beobachten ist. Die geringste Rissausbildung ist bei den Proben mit Kraibon® zu sehen, bei denen sowohl in x-, als auch in y-Richtung die durchschnittliche Risslänge mit 7,9mm und 8,4mm unter 10mm lag.



**Abbildung 41: Schadflächen Impactseite OS (oben li.); P4R (oben re.), DUO (unten li.); E035 (unten re.)**

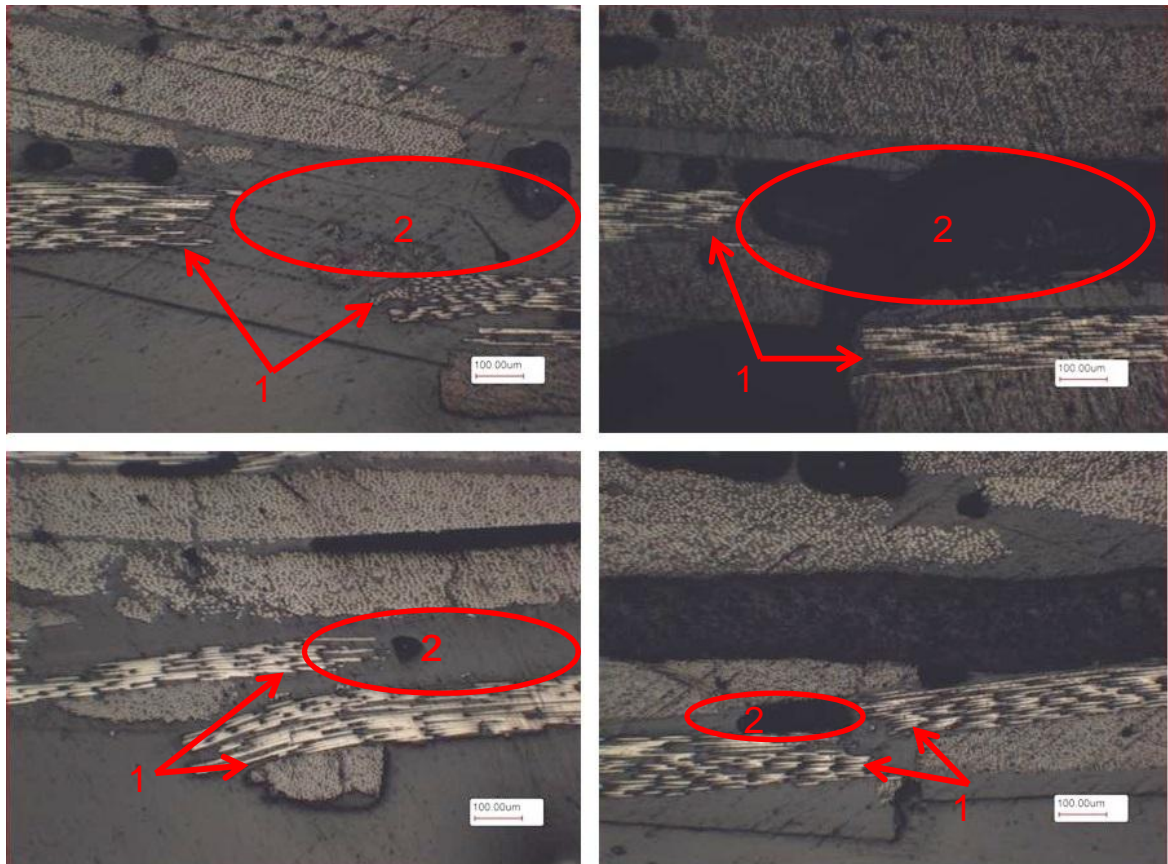


**Abbildung 42: Schadflächen Zugseite OS (oben li.); P4R (oben re.), DUO (unten li.); E035 (unten re.)**



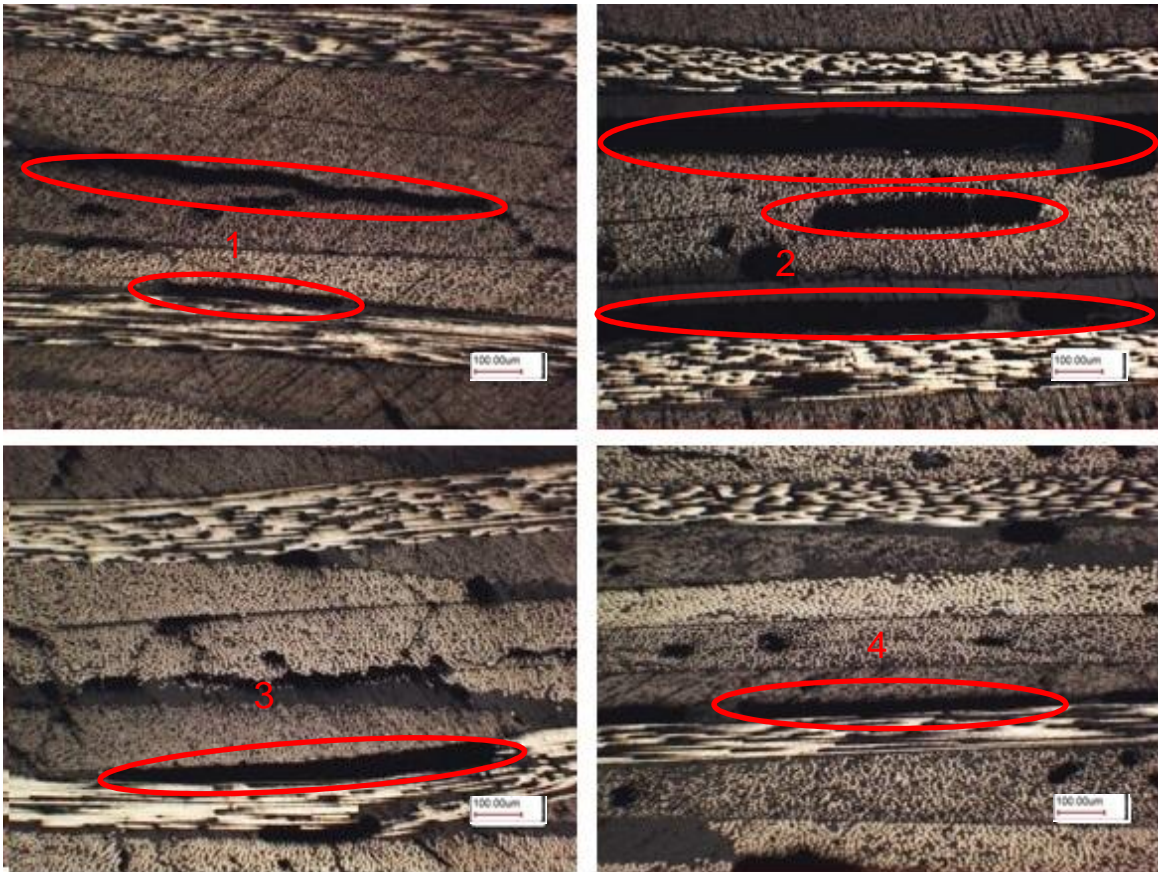
### 7.3 Mikroskopische Analyse

Zur genauen Betrachtung des Impactbereichs in der Querschnittsfläche wurde die Hälfte der Proben unter dem Mikroskop betrachtet. Nach erstem Begutachten des Querschnittes waren mit bloßem Auge lediglich die Schäden an der Zugseite und damit zum Teil leichte Delamination, bzw. bei den Proben mit PET-Folie bereits eine deutliche Delamination zu erkennen. Anschließend wurden Proben herausgeschnitten und zum Mikroskopieren eingebettet. Die entstanden Bilder wurden mit einer 50-fachen Vergrößerung aufgenommen.



**Abbildung 43: Schäden Zugseite OS (oben li.), P4R (oben re.), DUO (unten li.), E035 (unten re.)**

In Abbildung 43 sind die Schäden an der Zugseite der Proben dargestellt. Bis auf die E035-Proben weisen alle Proben neben ausgeprägten Faserbrüchen (Nr.1) auch bereits deutliche Ablösungen der äußeren Schichten auf (Nr.2). Am deutlichsten ist dies bei den Proben mit PET-Folien ausgeprägt, bei welchen zu beobachten ist, dass nicht nur Faserbrüche vorhanden sind, sondern auch die auf der Zugseite äußere Folienlage durchtrennt wurde und den Zugspannungen im Laminat nicht mehr standhalten konnte. Bei den Proben mit Kraibon® sind zwar Faserbrüche zu beobachten, jedoch reißt die Schadfläche nicht so weit auf und die Delamination ist weniger ausgeprägt.



**Abbildung 44:** : innere Schäden Impactproben OS (oben li.); P4R (oben re.); DUO (unten li.); E035 (unten re.)

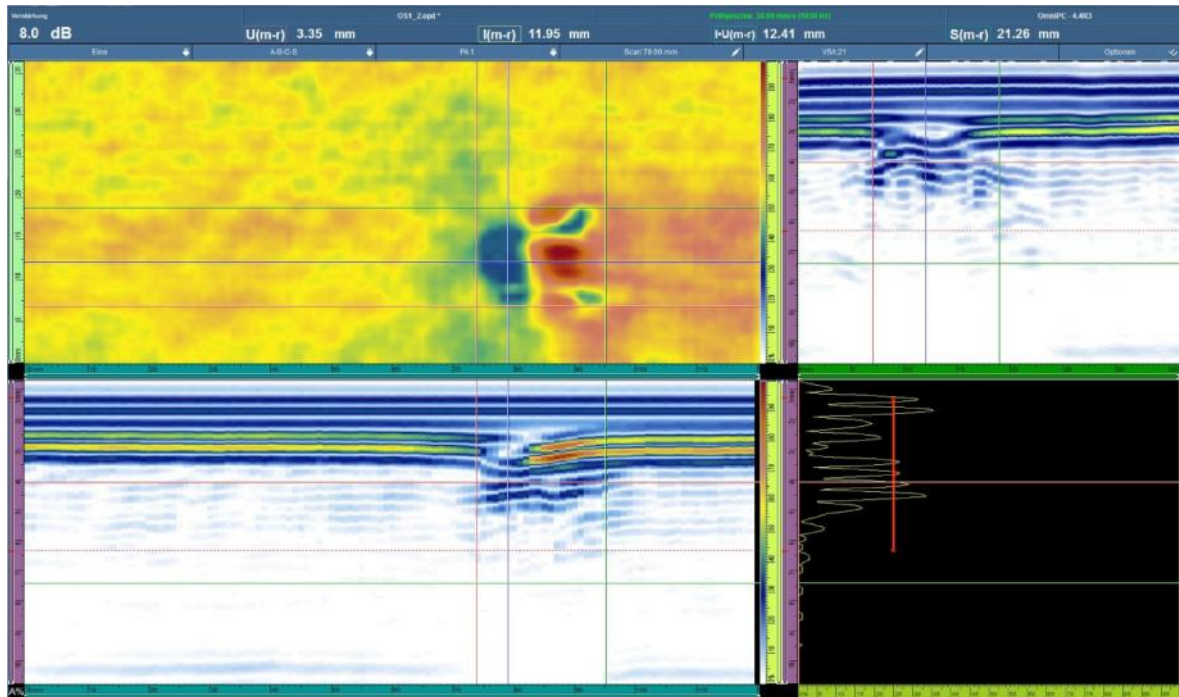
Im Inneren der Proben sind nach den Impacts erste Anzeichen von Delaminationen zwischen den Faserlagen zu erkennen (Abbildung 44: Nr. 1,2,3,4). Die meisten und größten Delaminationen sind bei den Proben mit PET-Folien zu erkennen (Nr.2). Diese liegen aber weniger im Inneren der Proben, sondern hauptsächlich an die Folien angrenzend, sowohl auf der Zugseite, als auch auf der Impactseite. Die Größe der Delaminationen war bei allen anderen Proben in etwa gleich. Dabei sind Delaminationen mit einer Größe von ca. 0,3-1,0mm aufgetreten, wobei die sichtbare Delaminationsdichte bei den Proben ohne Schlagschutz noch etwas höher ist. Proben mit DuoMod®-Partikeln und Kraibon® weisen in etwa die gleiche Delaminationsdichte auf. Darüber hinaus ist bei Kraibon® zu erkennen, dass die Anbindung der EPDM-Lagen zur Struktur weiterhin gegeben ist.

## 7.4 Auswertung der Ultraschallaufnahmen

Die Ultraschallaufnahmen werden als weiteres Bewertungskriterium für den Schaden der Struktur herangezogen. Im C-Bild sind mehrere Linien (Cursor) zu sehen. Während die roten und grünen Linien die Schadfläche begrenzen, zeigen die beiden blauen Linien auf, an welchen Stellen in der Struktur die abgebildeten B- (unten links) und S-Bilder (oben



rechts) entstanden sind. Das A-Bild bezieht sich auf die Stelle, an welchen sich die blauen Cursor kreuzen.



**Abbildung 45: Ultraschallaufnahme OS1**

In Abbildung 45 ist der Schaden bei der Probe OS1 zu sehen. Im C-Bild ist zu sehen, dass sich die Schadfläche relativ ungleichmäßig auffächert. Der blaue Bereich zeigt dabei die Fläche, an der die meisten Faserbrüche aufgetreten sind, was jeweils im S-Bild und im C-Bild zu sehen ist. Die schmalen blauen Flecken rechts zeigen, dass noch Faserbrüche vorhanden sind. Im B-Bild ist schließlich noch zu sehen, dass in den unteren Lagen eine Delamination entstanden ist. Die Ausdehnung der Schadfläche beläuft sich auf  $l(m-r)=11,95\text{mm}$  und  $S(m-r)=21,26\text{mm}$ .

Die Probe OS2 (Abbildung 46) zeigt ein ähnliches Schadverhalten. Der größere blaue Fleck im C-Bild zeigt wieder die Fläche, an welcher Faserbrüche vorliegen. Delaminationen sind in den unteren Schichten im B-Bild zu erkennen. Mit  $l(m-r)=14,53\text{mm}$  und  $S(m-r)=18,54\text{mm}$  liegt bei dieser Probe ohne Schlagschutz, eine ähnliche Schadfläche vor, wie bei OS1.

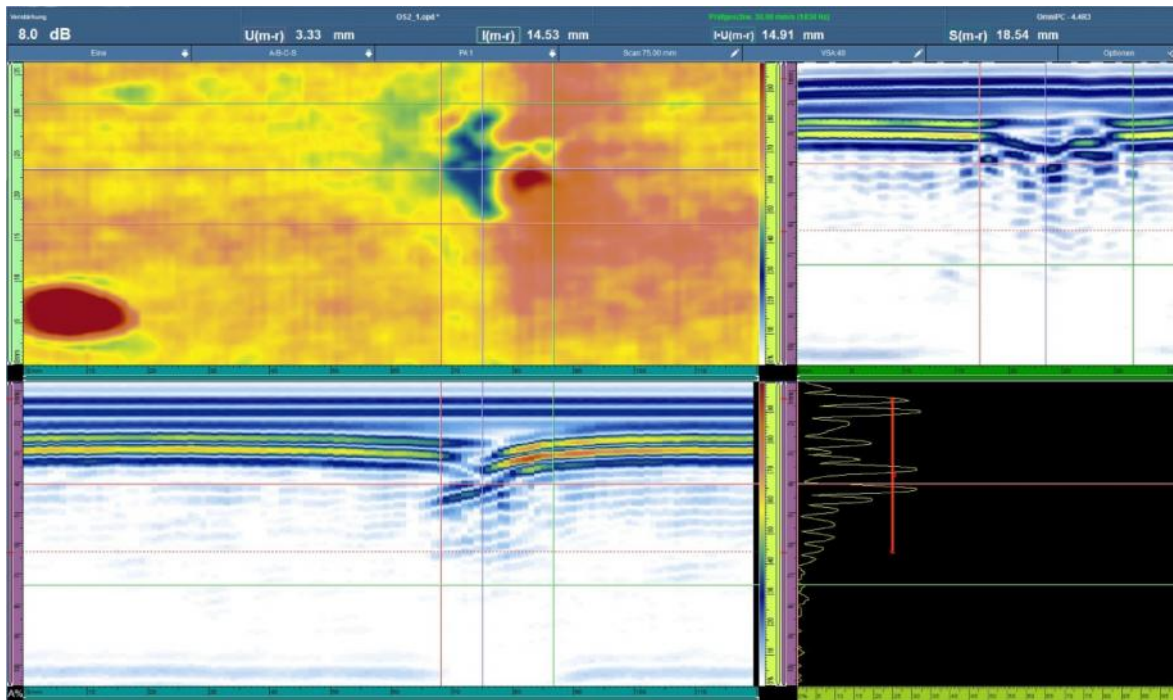


Abbildung 46: Ultraschallaufnahme OS2

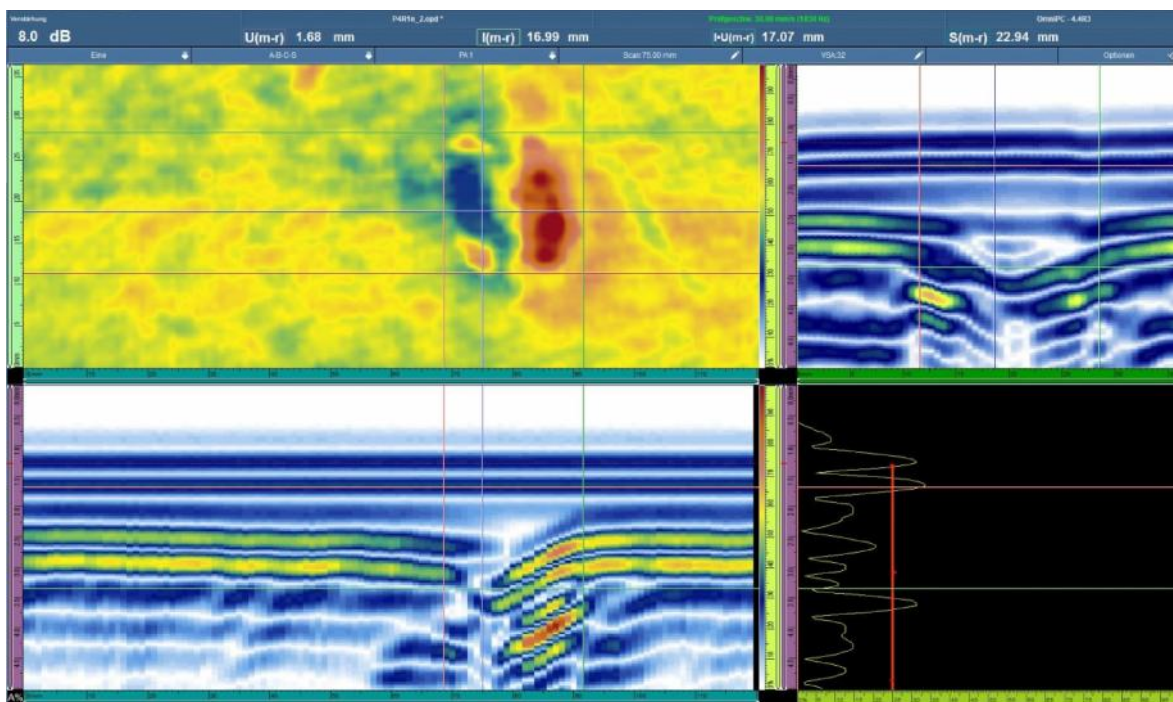


Abbildung 47: Ultraschallaufnahme P4R1

Bei der Probe P4R1 (Abbildung 47) zeigt der größere blaue Fleck erneut Faserbrüche. Der rote Fleck rechts daneben zeigt in diesem Bild deutlich die zusätzliche Delaminationsfläche. Darüber hinaus sind im B-Bild die Delaminationsflächen in den unteren Lagen gut zu erkennen. Die Ausdehnung der Schadflächen beläuft sich auf  $I(m-r)=16,99\text{mm}$  und  $S(m-r)=22,94\text{mm}$  und ist damit merklich größer als bei den Proben ohne Schlagschutz.



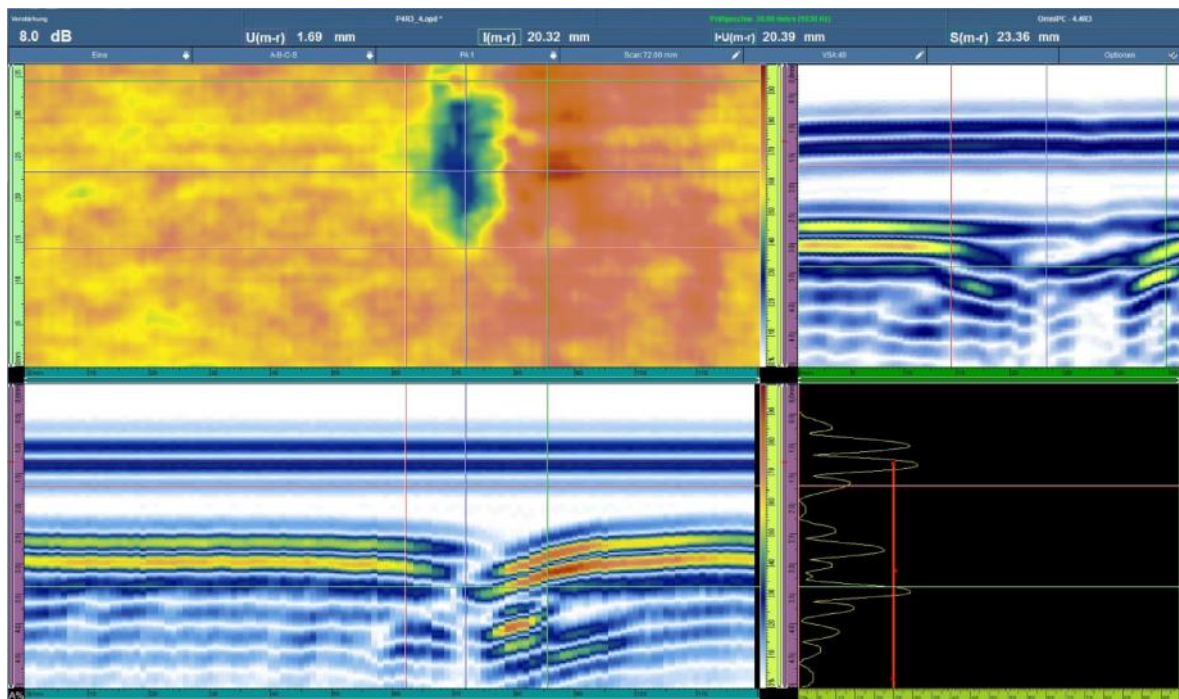


Abbildung 48: Ultraschallaufnahme P4R3

Bei der Probe P4R3 (Abbildung 48) ist ein ähnliches Bild zu sehen, jedoch ist die Delaminationsfläche nicht so gut zu erkennen wie bei der Aufnahme der Probe P4R1. Somit wird sich bei der Begrenzung der Schadfläche an dem B-Bild orientiert, um die Delamination aufzuzeigen. Die Schadfläche kommt bei dieser Probe somit auf eine Ausdehnung von  $I(m-r)=20,39\text{mm}$  und  $S(m-r)=23,36\text{mm}$ . Damit ist die Schadfläche bei der Probe P4R3 noch einmal größer, als bei der Probe P4R1.

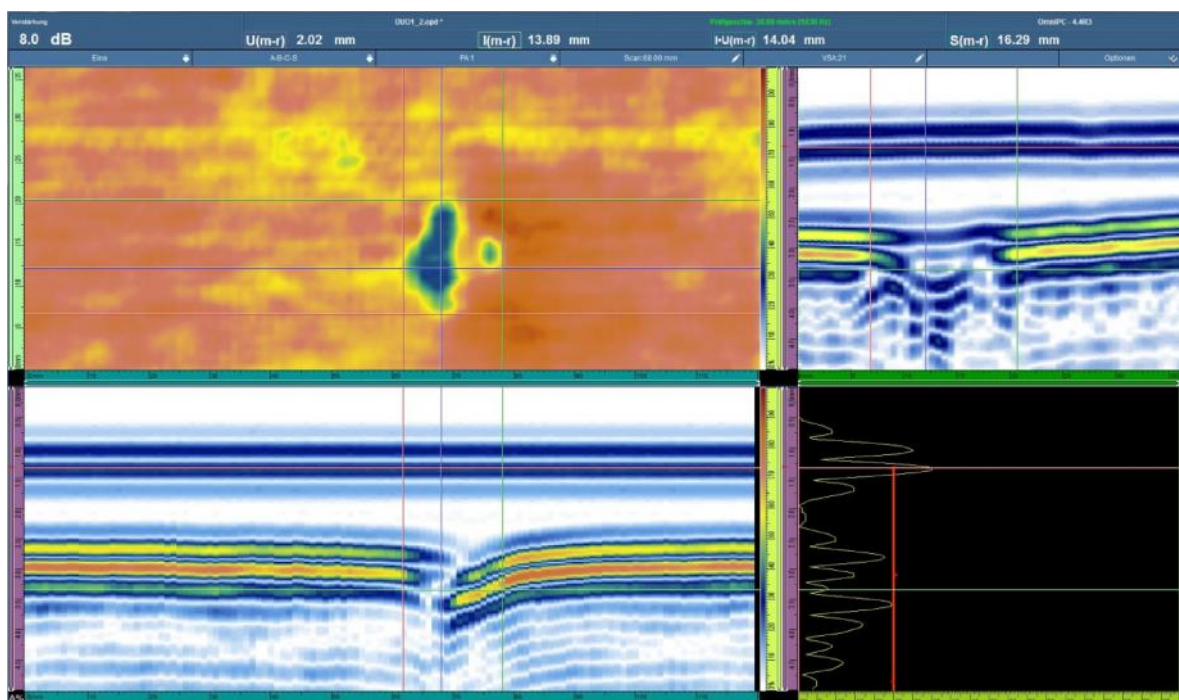
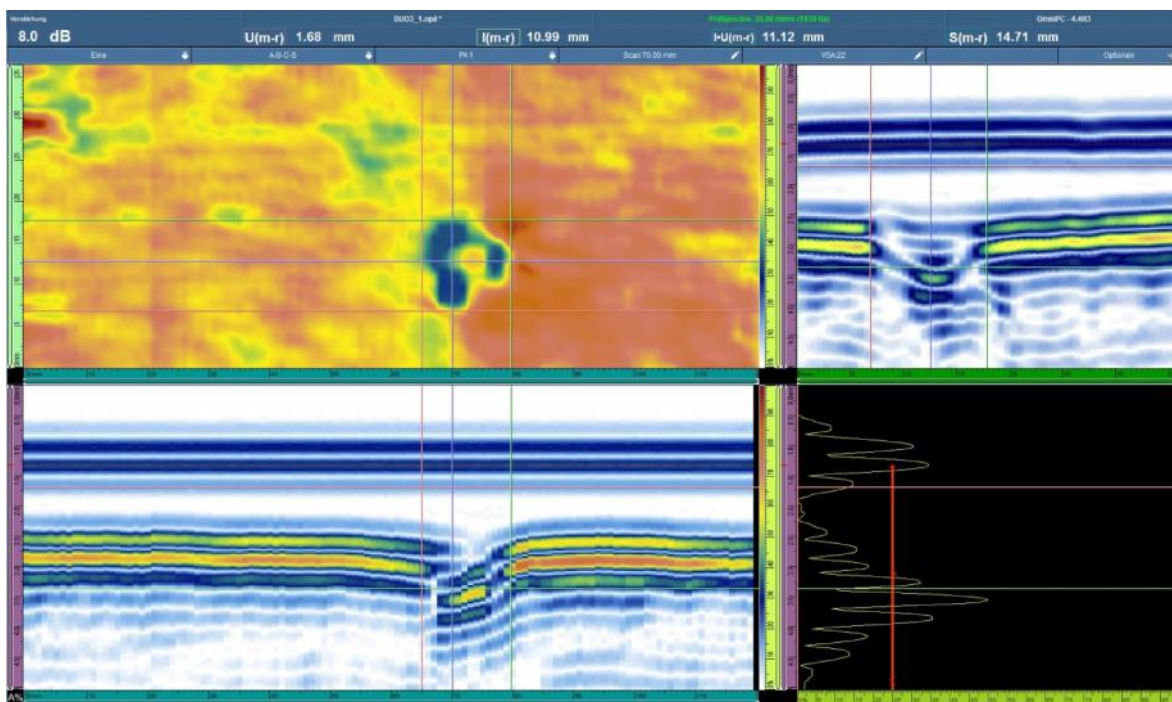


Abbildung 49: Ultraschallaufnahme Duo1

Die Schadfläche der Probe Duo1 (Abbildung 49) besitzt eine ähnliche Form, wie die Proben ohne Schlagschutz. Der Verlauf der Faserbrüche ist dem der Proben ohne Schlagschutz relativ ähnlich. Jedoch ist die Delamination nicht ganz so stark ausgeprägt, wie bei den Proben ohne Schlagschutz. Die Ausdehnung der Schadfläche ist mit  $I(m-r)=13,89\text{mm}$  und  $S(m-r)=16,29\text{mm}$ , in der Summe, nur unwesentlich kleiner als bei den Proben ohne Schlagschutz.

Bei der Probe Duo3 (Abbildung 50) zeigt sich im Vergleich mit der Probe Duo1 ein etwas anderes Schadensbild. Die Fläche mit Faserbrüchen ist bei dieser Probe deutlich größer, was im B-Bild deutlich zu sehen ist. Jedoch ist im B-Bild kaum Delamination zu erkennen und die Ausdehnung der Schadensfläche ist mit  $I(m-r)=10,99\text{mm}$  und  $S(m-r)=14,71\text{mm}$  kleiner als bei der Probe Duo1.



**Abbildung 50: Ultraschallaufnahme Duo3**

Die blaue Fläche ist bei E0351 (Abbildung 51) deutlich geringer, als bei allen anderen Probenarten. Somit ist die Anzahl der Faserbrüche deutlich geringer. Auch ist im B-Bild zu sehen, dass die Fasern auf der Zugseite zwar ausgebeult, jedoch noch nicht komplett gerissen sind. Delamination ist kaum sichtbar. Die Ausdehnung der Schadfläche ist mit  $I(m-r)=6,98\text{mm}$  und  $S(m-r)=13,90\text{mm}$  deutlich geringer als bei anderen Probenarten.



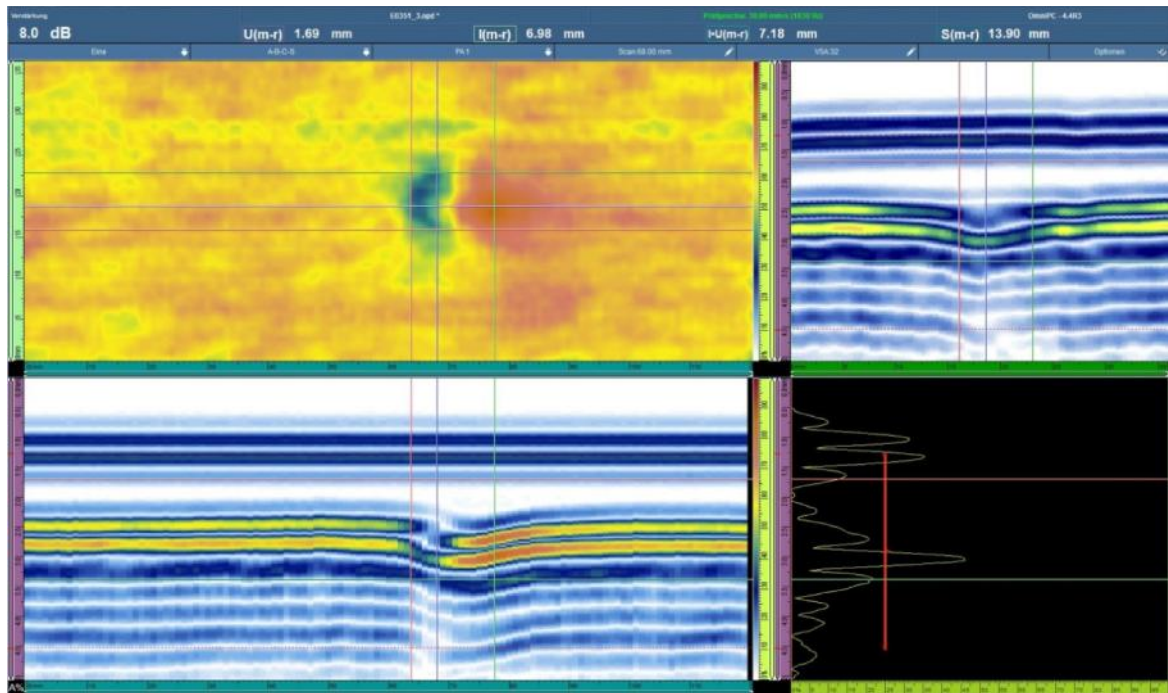


Abbildung 51: Ultraschallaufnahme E0351

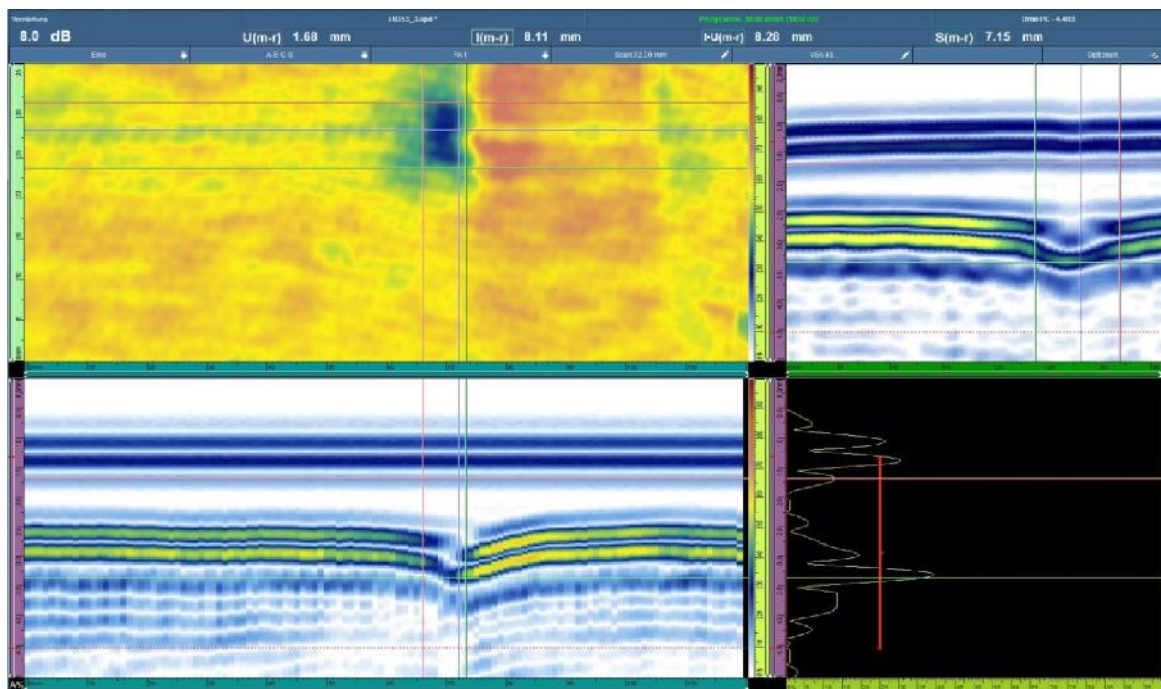


Abbildung 52: Ultraschallaufnahme E0353

Bei der Probe E0353 (Abbildung 52) ist die Fläche, welche die Faserbrüche veranschaulicht, zwar größer als bei der Probe E0351, jedoch ist die Schadfläche vergleichsweise gering und kaum Delamination zu beobachten. Somit erstreckt sich die Schadfläche über  $l(m-r)=8,28\text{mm}$  und  $S(m-r)=7,15\text{mm}$  und beide Proben mit Kraibon® weisen damit eine geringere Schadfläche auf als alle anderen Probenarten.

In Tabelle 7 sind noch einmal alle Werte zusammengefasst. Es ist erneut deutlich zu sehen, dass die Proben mit Kraibon® die geringsten Schäden durch den Impact erhalten haben und die Schadflächen bei den Proben mit PET-Folien am größten sind. Der Einsatz der DuoMod®-Partikel führt, im Vergleich zu den Proben ohne Schlagschutz, zu einer geringeren Schadfläche.

**Tabelle 7: Maße Schadflächen**

<b>Probenart</b>	<b>I(m-r) in mm</b>	<b>S(m-r) in mm</b>
OS1	11,95	21,26
OS2	14,53	18,54
P4R1	16,99	22,94
P4R3	20,39	23,36
DUO1	13,89	16,29
DUO3	10,99	14,71
E0351	6,98	13,90
E0353	8,28	7,15



## 8 Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vorversuche lassen auf eine gute Probenqualität aller Proben schließen. Zwar gibt es teilweise Unterschiede bei den Fehlergehalten der Proben mit gleichem Aufbau, wie OS1 und OS2, jedoch befinden sich alle diese unter 15%, was als in Ordnung anzunehmen ist. Weiterhin können diese Schwankungen darin begründet sein, dass jeweils nur ein zufälliger Querschnitt betrachtet wurde und deshalb noch keine aussagekräftigen Rückschlüsse zur Probenqualität getroffen werden können, sondern so nur eine Orientierung geliefert wird. Jedoch ist aufgefallen, dass Kraibon® nicht immer in der gleichen Schichtdicke vorhanden ist und es dabei Schwankungen gibt, was bei der Auslegung die Berechnung des Faservolumengehaltes erschwert. Ursache für die Abnahme der EPDM-Schichtdicke ist der hohe Druck, der während des Pressvorgangs auf die Proben wirkt. Dass die Schichtdicken nicht immer im gleichen Maße abnehmen, kann dadurch begründet werden, dass in manchen Fällen das EPDM verdrängt und aus der Probe gedrückt wird, in anderen Fällen jedoch weniger nachgibt und mehr Harz aus der Probe gedrängt wird. Die Faservolumengehalte aller Proben befinden sich zwischen 49-54%. Somit weisen alle Proben einen ähnlichen Faservolumengehalt auf und alle Proben haben eine gleiche Faserlagenanzahl mit einem quasiisotropen Aufbau. Damit können die Proben für den Vergleich der Untersuchungen herangezogen werden.

Nach den Impactversuchen konnten anhand der sichtbaren Schäden an der Oberfläche der Proben bereits erste Aussagen bezüglich der Impactresistenz getroffen werden. Die Impactspuren der Proben mit PET-Folien und der Proben mit DuoMod®-Partikeln weisen eine geringere Ausprägung auf, was darauf schließen lässt, dass ein dämpfender bzw. Energie absorbierender Effekt auf der Einschlagsseite vorhanden ist. Die Einschlagstellen bei den Proben mit Kraibon® sind bereits kaum noch vorhanden. Sie sind schwer sichtbar und mit der Hand auch nur noch sehr schwer zu ertasten. Kraibon® hat somit die größte dämpfende Wirkung auf der Einschlagsseite.

Bei der Rissbildung auf der Zugseite war ein ähnliches Bild zu beobachten. Ursache für die Rissbildung war die Durchbiegung der Proben und die damit einhergehenden Zugspannungen. Die größte Rissausbreitung wiesen die Proben ohne Schlagschutz auf, gefolgt von den Proben mit PET-Folie, den Proben mit DuoMod®-Partikeln und den Proben mit Kraibon®, die den geringsten sichtbaren Schaden aufweisen. Bei den Proben mit PET-Folie ist jedoch eine deutlichere Ausbeulung als bei anderen Proben zu beobachten, was die Folge einer höheren Delamination ist. Die Ausbeulung bei den Proben ohne Schlagschutz fällt geringer aus, was auf eine bessere Anbindung der äußeren Lagen schließen lässt und somit zu der Schlussfolgerung führt, dass die Anbindung der Folien wesentlich schlechter ist. Bei den Proben mit DuoMod®-Partikeln sind nur noch eine

Rissbildung und minimale Ausbeulung zu beobachten. Die Zähmodifizierung der Matrix durch die DuoMod®-Partikel führt dazu, dass Matrixbrüche, Delaminationen und Risse sich nicht so leicht ausbreiten können. Die Proben mit den EPDM-Schichten sind nur gering ausgebeult. Durch die geringere Steifigkeit der EPDM-Lagen geben diese bei einem Impact mehr nach als die restliche Struktur und nehmen so einen großen Teil der Impactenergie auf. In der Folge nehmen die Zugspannungen auf der Impact abgewandten Proben-seite ab. Kraibon® hält außerdem die Anbindung zu den Faserlagen aufrecht, was zu weniger Delaminationen an der Zugseite führt als bei den anderen Probenarten.

Durch Mikroskopieren und Ultraschalluntersuchungen wurden diese Ergebnisse noch einmal untersucht und geprüft, ob im Inneren der Proben noch weitere Schäden vorhanden sind. Bei allen Proben konnten unter dem Mikroskop kleinere innere Schäden in Form von Delaminationsflächen festgestellt werden. Da sowohl bei den Proben mit DuoMod®-Partikeln, als auch den Kraibon®-Proben die innere Anzahl und Größe der Schadflächen am geringsten ist, konnten die ersten Eindrücke bestätigt werden, wonach diese beiden Materialien den größten Einfluss auf das Impactverhalten haben. Bei den Proben mit DuoMod®-Partikeln ist das so genannte Crack-Bridging die Ursache für die geringe Schadensdichte, wonach die Partikel den Rissfortschritt und die Matrixbrüche unterbinden. Die EPDM-Lagen wiederum federn durch ihre dämpfende Wirkung die Impactenergie ab und die Struktur zwischen den EPDM-Lagen muss so weniger Energie aufnehmen. Da bei den PET-Proben nicht nur auf der Zugseite, sondern auch auf der Einschlagseite Delaminationen auftreten, wird der Eindruck verfestigt, dass die Folien als Impactschutz weniger geeignet sind als die anderen Schlagschutzarten, bzw. das Impactverhalten noch verschlechtern.

Die Ultraschallauswertungen, bei welchen die Schadflächen relativ genau vermessen werden konnten, bestätigen die ersten Erkenntnisse. Die Folien führen zur größten Delamination, da sie, trotz des Anrauens, immer noch eine unzureichende Anbindung zur Struktur haben. Dass die Schadflächen bei den Kraibon®-Proben mit Abstand am geringsten sind, ist auf die gute dämpfende Wirkung des EPDM zurückzuführen. Darüber hinaus weist es eine gute Integrität in die Struktur auf, was dazu führt, dass keine Delaminationen im Bereich der EPDM-Lagen zu sehen sind. Die größeren Schäden bei den Proben mit DuoMod®-Partikeln sind darin begründet, dass die Zähmodifizierung der Matrix, einen geringeren Eingriff in die Struktur darstellt als das Einfügen der EPDM-Schichten. Im Gegensatz zu Kraibon® wird die Energie bei den Proben mit DuoMod®-Partikeln nicht durch eine dämpfende Wirkung absorbiert, sondern durch die gesteigerte Zähigkeit der Matrix, wodurch diese resistenter gegen Matrixschäden geworden ist, was das geringere Schadverhalten im Vergleich mit den Proben ohne Schlagschutz begründet.

Nach allen Untersuchungen und Tests hat sich Kraibon® als bester Impactschutz herausgestellt, gefolgt von den DuoMod®-Partikeln, die ebenfalls noch einen positiven Effekt auf die Impactverhalten ausüben. Die PET-Folien sind, so wie hier verwendet, ungeeignet als

Impactschutz. Sie können zwar eine geringe dämpfende Wirkung aufweisen, wie auf der Einschlagseite zu sehen war, jedoch geht dieses nur in der Regel auf Kosten von Delamination.

Die DuoMod®-Partikel stellen eine gute Möglichkeit dar, das Impactverhalten zu verbessern, ohne jedoch einen zu großen Eingriff in die Struktur vorzunehmen und die Bauteilauslegung ändern zu müssen. Außerdem wird die Steifigkeit der Bauteile weniger negativ beeinflusst als durch die EPDM-Schichten. Die Möglichkeiten, das Impactverhalten zu verbessern, sind im Vergleich mit Kraibon® jedoch deutlich eingeschränkter und die Mischdauer von 6h Stunden ist als negativ zu bewerten.

Bei Kraibon® muss beachtet werden, dass die Schichtdicke beim Pressvorgang nicht immer gleichmäßig abnimmt und in diesem Verarbeitungsfall deshalb bei der Bauteilauslegung mit keinem exakten Faservolumengehalt gerechnet werden kann. Eigenschaften wie das Impactverhalten oder die Steifigkeit können dadurch eventuellen Schwankungen unterliegen, auch wenn dies durch die Versuchsergebnisse noch nicht sichtbar wurde. Hinzu kommt, dass vor allem bei dünnen Strukturen die Steifigkeit durch die geringere Faserlagenanzahl abnimmt, wie sich im ILS-Test gezeigt hat. Je dicker jedoch die Struktur ist, desto geringer ist der Einfluss des EPDMs auf die Steifigkeit. Kraibon® lässt sich außerdem gut verarbeiten, jedoch können die hohen Prozesstemperaturen ein Problem bei der Bearbeitung darstellen.

In dieser Arbeit wurde lediglich getestet, ob die einzelnen Schlagschutzarten einen Einfluss auf das Impactverhalten haben. Getestet wurde nicht, in welcher Konfiguration die Schlagschutzarten den bestmöglichen Einfluss haben. So kann bei den DuoMod-Partikeln® der Partikelgehalt variiert werden und bei den EPDM-Lagen kann die Lagenanzahl, die Positionierung der Lagen, die Lagendicke und die Lagenhärte variiert werden.



## 9 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Möglichkeit zu finden, das Schadensverhalten, durch einen transversalen Impact von CFK-Strukturen zu verbessern. Hierzu mussten zunächst die Mechanismen während eines Impacts an FVK-Strukturen erörtert und in die Problemstellung mit einbezogen werden. Nach der Recherche zu möglichen Schlagschutzkonzepten wurde schließlich eine Vorauswahl getroffen. Diese Schlagschutzkonzepte wurden durch die Bestimmung des Fehlergehalts und des Faservolumengehalts auf ihren Einfluss auf die Probenqualität und in der Folge mit dem ILS-Test auf ihre Integrität in die FVK-Struktur untersucht. Nach diesen Tests wurde eine finale Auswahl an Schlagschutzarten getroffen, die bei den Impactprüfungen getestet werden sollten. Die Probengeometrie hat sich an der Probenaufnahme orientiert. Bei den Proben handelte es sich um Flachproben mit den Maßen von 200mm x 200mm. Alle Proben besaßen einen quasiisotropen Aufbau, da dieser eine gleichmäßige Energieaufnahme senkrecht zum Impact ermöglichte. Darüber hinaus hatten alle Proben einen Faservolumengehalt von ca.50% und die gleiche Faserlagenanzahl, um ähnliche Grundvoraussetzungen bei allen Proben zu schaffen. Bei der Impactenergie wurde sich an einem Steinschlag durch Gleisschotter an einem Carbondrehgestell orientiert. Die Probendicke wurde auf 10% der realen Wandstärke eines Carbondrehgestells herunterskaliert und dementsprechend die Impactenergie angepasst. Damit wurden die Impacts an 3mm dicken Proben und einer Impactenergie von 20J durchgeführt. Als Impactvorrichtung wurde ein Fallturm mit einem stumpfen Impactor eingesetzt. Die Probenaufnahme wurde unter dem Gesichtspunkt, alle Randeffekte bei den Impacts so gut wie möglich auszuschließen, neu konstruiert. Die Impactergebnisse wurden mittels Mikroskopie und Ultraschalluntersuchungen ausgewertet. Folgende Auflistung zeigt noch einmal die wichtigsten Untersuchungsergebnisse auf:

- Interlaminare Zwischenschichten führen zu einem erhöhten Fehlergehalt in der Probe, da die Zwischenschichten wie Sperrschichten wirken, die ein Entweichen der Gase deutlich erschweren.
- PET-Folien beeinflussen die interlaminare Scherfestigkeit negativ, da die Anbindung zur Struktur aufgrund ihrer glatten Oberfläche nicht so gut ist. Durch das Lochen oder Anrauen der Folien kann die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit jedoch verbessert werden. Mit zunehmender Anzahl der PET-Lagen sinkt die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit.
- Das Austauschen von Faserlagen durch EPDM-Lagen führt zu einer Abnahme der Probensteifigkeit.
- Die Dicke der EPDM-Lagen nimmt während des Pressvorgangs ab.

- Die scheinbare interlaminare Scherfestigkeit ist bei Proben mit DuoMod®-Partikeln etwas geringer, als bei Proben ohne Schlagschutz.
- Nach allen Voruntersuchungen wurde eine Auswahl für die Impactversuche getroffen. Als Referenz dienten Proben ohne Schlagschutz. Darüber hinaus wurden Proben mit 4 Lagen angerauter PET-Folie, Proben mit 2 Lagen EPDM (Lagendicke 0,35mm) und Proben mit DuoMod®-Partikeln (6%-Partikelgehalt) gefertigt. Von jeder Probenart wurden 4 Proben getestet.
- PET-Folien sind als Schlagschutz ungeeignet. Trotz des Anrauens der Folie ist die Anbindung der Folie an die Struktur weiterhin schlecht und durch den Impact entstehen so größere Delaminationsflächen als bei den anderen Probenarten.
- DuoMod®-Partikel verbessern das Impactverhalten und verringern die Schädigungen im Vergleich zu den Proben ohne Schlagschutz und mit PET-Folien. Das Impactverhalten wird hierbei durch die Zähmodifizierung der Matrix erreicht, wobei die Partikel die Ausbreitung von Rissen, Matrixbrüchen und Delaminationen einschränkt, bzw. unterbindet. Darüber hinaus muss der Lagenaufbau der Struktur beim Einsatz der Partikel nicht angepasst werden.
- Kraibon® hat den größten Einfluss auf das Impactverhalten der Strukturen. Durch die gute dämpfende Wirkung werden die Schäden, sowohl auf der Impactseite, als auch auf der Zugseite, am meisten eingeschränkt. Faserbrüche wurden auf ein Minimum reduziert und Delaminationen sind fast überhaupt nicht vorhanden, was heißt, dass trotz des Impacts die Anbindung der EPDM-Lagen zu der Struktur weiterhin gegeben ist.

## 10 Ausblick

Die in dieser Arbeit getätigten Untersuchungen geben einen Überblick, welche Schlagschutzarten einen Einfluss auf das Impactverhalten haben. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen. Bei einem Impact spielen mehrere Faktoren eine Rolle, welche noch mit berücksichtigt werden müssen. Zu untersuchen wäre u.a. der Einfluss der Geschwindigkeit. Bei höheren Geschwindigkeiten und niedrigeren Impactormassen ist ein anderes Schadensverhalten zu erwarten. Des Weiteren spielt an dieser Stelle die Impactorgeometrie eine Rolle. Darüber hinaus kann nicht genau gesagt werden, ob die Bauteildicke und Impactenergie ohne weiteres herunterskaliert werden kann, oder ob die FVK-Strukturen, ohne das Herunterskalieren, ein anderes Schadensverhalten zeigen.

Bei den DuoMod®-Partikeln kann darüber hinaus der Einfluss des Partikelgehalts untersucht werden. Wird das Schadensverhalten mit steigendem Partikelgehalt besser, oder verändert es sich nicht? Außerdem ist interessant, ob es einen maximalen Partikelgehalt gibt, der einzuhalten ist. Unter Umständen kann ein zu hoher Partikelgehalt zu Verschlechterung der Eigenschaften, wie Steifigkeit oder Festigkeit führen. Weiterhin ist das Verhalten bei hohen und niedrigen Temperaturen noch zu betrachten.

Ähnlich sieht es bei Kraibon® aus, wo viele unterschiedliche Konfigurationen möglich sind. So gibt es neben der untersuchten Kraibon®-Art noch weitere Arten, die sich in der Lagendicke und der Härte unterscheiden. Den Einfluss der EPDM-Lagendicke und der Härte gilt es dabei zu untersuchen und herauszufinden, welche Arten sich in den jeweiligen Anwendungsfällen am besten eignen. So wird bei unterschiedlichen Impactgeschwindigkeiten und Impactorgeometrien jeweils eine unterschiedliche Lagenart am besten geeignet sein. Darüber hinaus gilt es zu ermitteln, wie die Lagen am besten platziert werden, um die Vorteile des Kraibon® bestmöglich zu nutzen.

Es wird bei diesen Betrachtungen offensichtlich, dass noch einige Untersuchungen mit den Schlagschutzarten durchgeführt werden müssen, ehe endgültige Aussagen zur Eignung getroffen werden können. Vor allem die vielen Möglichkeiten Kraibon® zu verarbeiten, sollte es jedoch ermöglichen für jeden speziellen Anwendungsfall, die passende Konfiguration zu finden. Da bei einem Impact an FVK-Strukturen jedoch viele Einflussfaktoren vorliegen, ist es dementsprechend schwierig die passende Konfiguration zu ermitteln.





## Literatur

- [1] Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007
- [2] Abrate, Serge: Impact Engineering Of Composite Structures, Udine, Springer Wien New York, 2011
- [3] European Space Agency for the members of ECSS, Space engineering, Insert design handbook, Noordwijk, ESA Requirements and Standards Division, 2011
- [4] Flemming, Manfred; Roth Siegfried: Faserverbundbauweisen-Eigenschaften, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003
- [5] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe, 3., vollständig überarbeitete Auflage, Frankfurt am Main, Vieweg+Teubner, 2010
- [6] Feindler, Nico: Charakterisierungs-und Simulationsmethodik zum Versagensverhalten energieabsorbierender Faserverbundstrukturen- 2012 – S.145  
  
München, TU München, Fakultät für Maschinenwesen, Doktorarbeit, 2012
- [7] Wierach, Peter; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Ergebnisse der Matrixoptimierung auf Impact und Brandlast mit Prozessbeschleunigung, Hamburg, 2011
- [8] Riedel, Ulrich, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Nanotechnologie im Faserverbundleichtbau, Hamburg, 2007
- [9] Pearson, Raymond A.; Yee, Albert F., University of Michigan: Toughening mechanisms in thermoplastic-modified epoxies: 1.

Modification using poly(phenylene oxide), Ann Arbor, 1992

- [10] Brooker, R.D.; Kinloch, A.J.; Taylor A.C., Imperial College London: The Morphology and Fracture Properties of Thermoplastic-Toughened Epoxy Polymers, London, 2010
- [11] Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG: Optimierung von FVK-Strukturen durch die direkte Integration von Elastomeren, Waldkraiburg, 2011
- [12] imk automotive GmbH: Leichtbau mit funktionsoptimierten Verbundwerkstoffen, Chemnitz, 2015
- [13] imk automotive GmbH: Methodische Auslegung impactbeanspruchter Strukturen, Chemnitz, 2015
- [14] Lopes; Stefaniak; Camanho; Freitas; Reis, Universität Lissabon: Fatigue behaviour of cfrp/steel hybrid composites, Lissabon, 2015
- [15] Pegoretti, Alessandro; Cristelli, Ivan; Migliaresi, Claudio, University of Trento: Experimental optimization of the impact energy absorption of epoxy-carbon laminates through controlled delamination, Trento, 2008
- [16] Herbeck, Lars; Herrmann, Axel S.; Riedel, Ulrich; Kleineberg, Markus, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V: Anwendungen von Faserverbundwerkstoffen in der Verkehrstechnik, Braunschweig, 2001
- [17] Weiss, Johannes, Hochschule Konstanz: Skript Karosserieleichtbau, Konstanz, 2016
- [18] Norm DIN EN ISO 14130 Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach dem Dreipunktverfahren mit kurzem Balken
- [19] Norm DIN EN 13450 Gesteinskörnungen für Gleisschotter

- [20] [https://de.wikipedia.org/wiki/VW\\_Golf\\_VII](https://de.wikipedia.org/wiki/VW_Golf_VII), verfügbar am 22.06.2017
- [21] <https://www.linkedin.com/pulse/maplan-uk-ltd-agents-kraiburg-compounds-new-material-future-john-gray>, verfügbar am 22.06.2017
- [22] <https://de.wikipedia.org/wiki/Leichtbauweise>, verfügbar am 09.02.2017
- [23] [https://de.wikipedia.org/wiki/Faserverbundwerkstoff#Typen\\_und\\_Herstellungsv erfahren](https://de.wikipedia.org/wiki/Faserverbundwerkstoff#Typen_und_Herstellungsv erfahren), verfügbar am 24.05.2017
- [24] [http://www.r-g.de/wiki/Das\\_Vakuumpressen](http://www.r-g.de/wiki/Das_Vakuumpressen), verfügbar am 03.05.2017
- [25] [http://www.r-g.de/wiki/Das\\_Injektionsverfahren](http://www.r-g.de/wiki/Das_Injektionsverfahren), verfügbar am 03.05.2017
- [26] <http://www.kraibon.de/branchen>, verfügbar am 03.05.2017
- [27] <http://www.kraibon.de/einsatzbereiche/einschlagschutz-dev>, verfügbar am 03.05.2017
- [28] <https://de.wikipedia.org/wiki/Dyneema#Eigenschaften>, verfügbar am 12.05.2017
- [29] <https://de.wikipedia.org/wiki/Aramide#Verwendung>, verfügbar am 12.05.2017
- [30] [https://de.wikipedia.org/wiki/Biaxial\\_orientierte\\_Polyester-Folie](https://de.wikipedia.org/wiki/Biaxial_orientierte_Polyester-Folie), verfügbar am 12.05.2017
- [31] [http://www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/wir/vt\\_642.shtml](http://www.erzgebirgsbahn.de/erzgebirgsbahn/view/wir/vt_642.shtml), verfügbar am 16.05.2017

- [32] <http://www.chemie.de/lexikon/Ultraschallprüfung.html>,  
verfügbar am 23.05.2017
- [33] <http://www.olympusims.com/de/ndttutorials/instrumentation/ascan/>,  
verfügbar am 23.05.2017
- [34] <http://www.olympusims.com/de/ndttutorials/instrumentation/bscan/>,  
verfügbar am 23.05.2017
- [35] <http://www.olympusims.com/de/ndttutorials/instrumentation/cscan/>,  
verfügbar am 23.05.2017
- [36] <http://www.olympus-ims.com/de/ndttutorials/instrumentation/pascscan/>,  
verfügbar am 22.06.2017
- [37] [http://www.r-g.de/wiki/Datei:Schema\\_Handlaminat.jpg](http://www.r-g.de/wiki/Datei:Schema_Handlaminat.jpg), verfügbar  
am 06.07.2017
- [38] [http://www.r-g.de/wiki/Datei:1.43\\_Pressen.jpg](http://www.r-g.de/wiki/Datei:1.43_Pressen.jpg), verfügbar am  
06.07.2017
- [39] <https://www.cop-shop.de/de/content/schutzwesten-ballistische-schutzausruestung-100.html>,  
verfügbar am 22.06.2017
- [40] <http://www.zib-militaria.de/BW-Kevlarhelm>, verfügbar am  
22.06.2017
- [41] <http://www.schrauben-normen.de/anziehmomente.html>, verfügbar  
am 22.06.2017
- [42] [https://de.wikipedia.org/wiki/Quasiisotropes\\_Laminat](https://de.wikipedia.org/wiki/Quasiisotropes_Laminat), verfügbar  
am 22.06.2017

## Anlagen

Datenblatt MGS® RIM 935.....	A-I
Hostaphan® RNK .....	A-VII
Datenblatt Kraibon®.....	A-X
Verarbeitung Kraibon®.....	A-XI
Datenblatt DuoMod® DP5045.....	A-XII
DuoMod® DP5045 Präsentation .....	A-XIII
DuoMod® DP5045 Verarbeitung .....	A-XIV



# Anlagen, Datenblatt MGS® RIM 935



CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 763 60 61

2.2 - 21

## Infusionsharz MGS® RIM 935

Härter MGS® RIMH 936 / RIMH 937

	Seite	Überblick
Kurzcharakteristik	21	
Anwendung	22	
Spezifikationen	23	
Verarbeitungskennwerte	24	
Mischungsverhältnisse	24	
Viskositätsanstieg	24	
Temperaturanstieg	25	
Mischviskosität	25	
Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) unkonditioniert	26	
DMA	26	

<b>Zulassung</b>	-
<b>Einsatz-gebiete</b>	Anwendungen, die hohe Wärmefestigkeit erfordern Boots- und Schiffsbau, Sportgeräte, Automobilteile Formen- und Vorrichtungsbau
<b>Einsatz-temperaturen</b>	-60 °C bis +130°C nach Temperung
<b>Verarbeitung</b>	bei Temperaturen zwischen 15 °C und 50 °C, bevorzugt 20 bis 35 °C Bevorzugt Vakuuminfusionsverfahren oder Infusionsverfahren
<b>Besondere Merkmale</b>	sehr hohe Wärmefestigkeit, geringe Gemischviskosität, gute mechanische Eigenschaften, Topfzeitbereich ca. 2-5 h, kurze Härtingszeiten bei höheren Temperaturen
<b>Spezielle Einstellungen</b>	auf Anfrage
<b>Lagerung</b>	in original verschlossenen Gebinden 24 Monate bei Raumtemperatur haltbar

### Kurz- charakteristik

HEXION SPECIALTY CHEMICALS übernimmt keine Garantie, weder ausdrücklich noch stillschweigend, für ein Produkt oder dessen Marktängigkeit oder Tauglichkeit für einen beliebigen Zweck oder für die Richtigkeit der von HEXION SPECIALTY CHEMICALS bereitgestellten Informationen, sondern das Unternehmen garantiert lediglich, dass das Produkt den vertraglichen Spezifikationen entspricht und kein in den Vereinigten Staaten gültiges Patent verletzt. HEXION SPECIALTY CHEMICALS hat vorausgesetzt, dass die hier angegebenen Informationen zur Zeit der Erstellung korrekt waren oder aus vermeintlich zuverlässigen Quellen stammen. Es obliegt jedoch dem Benutzer, andere angemessene Informationsquellen zu prüfen und zu verstehen, alle Gesetze und Verfahren zu befolgen, die für den sicheren Umgang und die sichere Benutzung des Produktes gelten und die Eignung des Produktes für den geplanten Einsatz zu bestimmen.

Stand: 08/2006



Technische Information  
Epoxy and Phenolic Resins Division  
Epoxy Resins

2.2 - 22

### Infusionsharz MGS® RIM 935

Niederviskoses Infusionsharzsystem für die Verarbeitung von Fasergelegen mit geringem bis hohem Flächengewicht. Durch die sehr guten mechanischen Eigenschaften eignen sich diese Systeme zur Herstellung von statisch und dynamisch hochbelasteten Bauteilen mit hohen Warmfestigkeiten.

Infusionsharz RIM935 ist ein Produkt, dessen Formulierung auf Bisphenol A/F EP Harzen basiert. Die Härter RIMH 936 und RIMH 937 sind Modifikationen aus cycloaliphatischen Aminen. Durch den chemischen Aufbau ist eine Kristallisation der A- und B-Komponente möglich. Eine Kristallisation, wie im letzten Abschnitt beschrieben, muss vor der Verarbeitung durch Erwärmen beseitigt werden.

Die Topfzeit (100g-Ansatz bei 30 °C) liegt bei ca. 2 h für RIMH 936 und bei 3,5 h für RIMH 937. Optimale Viskositäten für das Infusionsverfahren erhält man bei Temperaturen im Bereich von 25 - 40 °C. Die Topfzeiten liegen dann noch im Bereich von ca. 1 h (RIMH 936 bei 40 °C) bis ca. 5 h (RIMH 937 bei 25 °C). Nach der Anhärtung bei Raumtemperatur sind die Teile noch spröde und müssen vor der Bearbeitung oder Entformung bei mindestens 50 °C vorgetempert werden. Eine direkte Aushärtung bei höheren Temperaturen (60-100 °C) ist bei dünnwandigen Teilen (Laminatdicken je nach Härter bis ca. 30 mm) möglich. Die Härtingszeiten können dadurch bis auf wenige Minuten reduziert werden.

Auch bei ungünstigen Anhärtungsbedingungen, wie tiefen Temperaturen oder hohen Luftfeuchtigkeiten, erhält man klebfreie, hochglänzende Oberflächen.

Das Infusionsharzsystem enthält keine unreaktiven Zusätze. Die eingesetzten Rohstoffe haben einen sehr geringen Dampfdruck, so dass die Systeme auch bei erhöhten Temperaturen unter Vakuum verarbeitet werden können. Auch sind bei der Kombination mit UP-Vorgelaten, diversen Lacken (z. B. auf PUR-Basis) usw. kaum Verträglichkeitsprobleme zu erwarten. Eine ausreichende Abprüfung ist jedoch in jedem Fall unerlässlich.

Die einschlägigen Sicherheitshinweise zum Umgang mit Epoxidharzen und Härtungsmitteln sowie unsere Hinweise zur sicheren Verarbeitung sind zu beachten.

### Anwendung

Stand: 12/2006

HEXION SPECIALTY CHEMICALS übernimmt keine Garantie, weder ausdrücklich noch stillschweigend, für ein Produkt oder dessen Marktängigkeit oder Tauglichkeit für einen beliebigen Zweck oder für die Richtigkeit der von HEXION SPECIALTY CHEMICALS bereitgestellten Informationen, sondern das Unternehmen garantiert lediglich, dass das Produkt den vertraglichen Spezifikationen entspricht und kein in den Vereinigten Staaten gültiges Patent verletzt. HEXION SPECIALTY CHEMICALS hat vorausgesetzt, dass die hier angegebenen Informationen zur Zeit der Erstellung korrekt waren oder aus vermeintlich zuverlässigen Quellen stammen. Es obliegt jedoch dem Benutzer, andere angemessene Informationsquellen zu prüfen und zu verstehen, alle Gesetze und Verfahren zu befolgen, die für den sicheren Umgang und die sichere Benutzung des Produktes gelten und die Eignung des Produktes für den geplanten Einsatz zu bestimmen.

Stand: 08/2006

Am Osttal 21/22  
70327 Stuttgart  
Germany  
Telefon: +49 (0) 711 - 3 89 80 00  
Telefax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011  
[www.hexionchem.com](http://www.hexionchem.com)





Technische Information  
Epoxy and Phenolic Resins Division  
Epoxy Resins

2.2 - 23

## Infusionsharz MGS® RIM 935

		Infusionsharz RIM 935
Dichte	[g/cm³]	1,14 - 1,16
Viskosität	[mPas]	300 - 600
Epoxid-äquivalent	[g/Äquivalent]	155 - 165
Epoxidwert	[Äquivalent / 100g]	0,61 - 0,64
Brechungsindex		1,5350 - 1,5450

## Spezifikationen

## Messbedingungen:

Durchführung der Messungen bei 25 °C

		RIMH 936	RIMH 937
Dichte	[g/cm³]	0,92 - 0,97	0,92 - 0,96
Viskosität	[mPas]	10 - 50	30 - 100
Aminzahl	[mg KOH/g]	550 - 650	450 - 500
Brechungsindex		1,4850 - 1,4920	1,4850 - 1,5050

## Messbedingungen:

Durchführung der Messungen bei 25 °C

Stand: 12/2006

HEXION SPECIALTY CHEMICALS übernimmt keine Garantie, weder ausdrücklich noch stillschweigend, für ein Produkt oder dessen Marktängigkeit oder Tauglichkeit für einen beliebigen Zweck oder für die Richtigkeit der von HEXION SPECIALTY CHEMICALS bereitgestellten Informationen, sondern das Unternehmen garantiert lediglich, dass das Produkt den vertraglichen Spezifikationen entspricht und kein in den Vereinigten Staaten gültiges Patent verletzt. HEXION SPECIALTY CHEMICALS hat vorausgesetzt, dass die hier angegebenen Informationen zur Zeit der Erstellung korrekt waren oder aus vermeintlich zuverlässigen Quellen stammen. Es obliegt jedoch dem Benutzer, andere angemessene Informationsquellen zu prüfen und zu verstehen, alle Gesetze und Verfahren zu befolgen, die für den sicheren Umgang und die sichere Benutzung des Produktes gelten und die Eignung des Produktes für den geplanten Einsatz zu bestimmen.

Stand: 08/2006

Am Ostfild 21/22  
70327 Stuttgart  
Germany  
Telefon: +49 (0) 711 - 3 89 80 00  
Telefax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011  
[www.hexionchem.com](http://www.hexionchem.com)

**Infusionsharz MGS® RIM 935**

	Infusionsharz RIM 935	Härter RIMH 936	Härter RIMH 937
Mittlerer EP- Wert	0,63	-	-
Mittleres Aminäquivalent	-	45	59

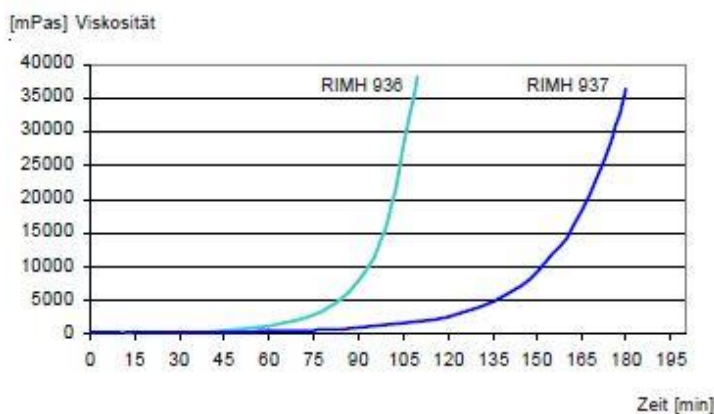
**Verarbeitungs-  
kennwerte**

	RIM 935: RIMH 936	RIM 935: RIMH 937
Gewichtsteile	100 : 29 ± 2	100 : 38 ± 2
Volumenteile	100 : 35 ± 2	100 : 45 ± 2

**Mischungs-  
verhältnisse**

Die angegebenen Mischungsverhältnisse sind möglichst genau einzuhalten. Die Erhöhung oder Verringerung der Härteranteile bewirken keinesfalls eine schnellere oder langsamere Reaktion, sondern nur eine unvollständige Aushärtung des Formstoffs, die auch durch Nachbehandlungen nicht mehr korrigiert werden kann.

Harz und Härter müssen sehr sorgfältig miteinander vermischt werden - im Mischgefäß dürfen keinerlei Schlieren sichtbar sein. Achten Sie dabei vor allem auf den Boden die Wandungen der Mischgefäße!

**Viskositätsanstieg bei 40 °C in dünner Schicht**

**Viskositäts-  
anstieg**

HEXION SPECIALTY CHEMICALS übernimmt keine Garantie, weder ausdrücklich noch stillschweigend, für ein Produkt oder dessen Marktgängigkeit oder Tauglichkeit für einen beliebigen Zweck oder für die Richtigkeit der von HEXION SPECIALTY CHEMICALS bereitgestellten Informationen, sondern das Unternehmen garantiert lediglich, dass das Produkt den vertraglichen Spezifikationen entspricht und kein in den Vereinigten Staaten gültiges Patent verletzt. HEXION SPECIALTY CHEMICALS hat vorausgesetzt, dass die hier angegebenen Informationen zur Zeit der Erstellung korrekt waren oder aus vermeintlich zuverlässigen Quellen stammen. Es obliegt jedoch dem Benutzer, andere angemessene Informationsquellen zu prüfen und zu verstehen, alle Gesetze und Verfahren zu befolgen, die für den sicheren Umgang und die sichere Benutzung des Produktes gelten und die Eignung des Produktes für den geplanten Einsatz zu bestimmen.

Stand: 05/2006

 Am Osttal 21/22  
 70327 Stuttgart  
 Germany  
 Telefon: +49 (0) 711 - 3 89 80 00  
 Telefax: +49 (0) 711 - 3 89 80 011  
[www.hexionchem.com](http://www.hexionchem.com)

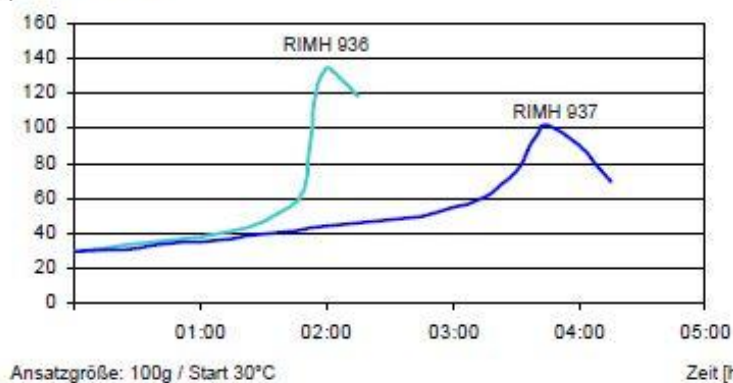


Infusionsharz MGS® RIM 935

Technische Information  
Epoxy and Phenolic Resins Division  
Epoxy Resins

2.2 - 25

[°C] Temperatur

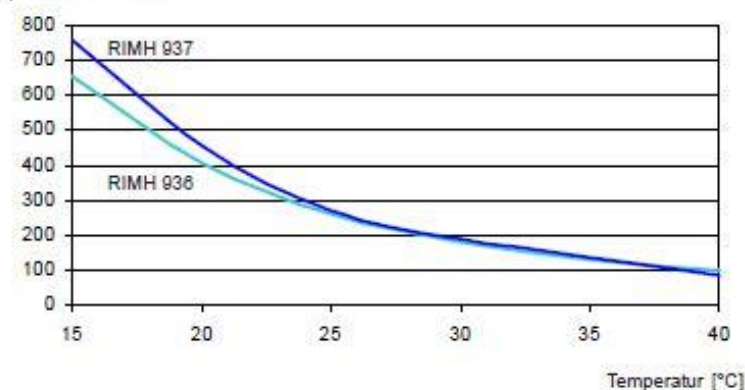


Die optimale Verarbeitungstemperatur liegt zwischen 20 °C und 35 °C. Höhere Verarbeitungstemperaturen sind möglich, sie verkürzen jedoch die Topfzeit. Eine Erhöhung der Verarbeitungstemperatur um 10 °C verkürzt die Topfzeit auf die Hälfte. Wasser (z. B. bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit oder in Füllstoffen enthalten) wirkt als Beschleuniger auf die Harz-Härterreaktion. Unterschiedliche Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten bei der Verarbeitung haben jedoch keinen nennenswerten Einfluss auf die Festigkeit des gehärteten Formstoffs.

**Temperatur-  
anstieg**

Mischviskosität ↔ Temperatur

[mPas] Viskosität



**Mischviskosität**

Stand: 12/2006

HEXION SPECIALTY CHEMICALS übernimmt keine Garantie, weder ausdrücklich noch stillschweigend, für ein Produkt oder dessen Marktängigkeit oder Tauglichkeit für einen beliebigen Zweck oder für die Richtigkeit der von HEXION SPECIALTY CHEMICALS bereitgestellten Informationen, sondern das Unternehmen garantiert lediglich, dass das Produkt den vertraglichen Spezifikationen entspricht und kein in den Vereinigten Staaten gültiges Patent verletzt. HEXION SPECIALTY CHEMICALS hat vorausgesetzt, dass die hier angegebenen Informationen zur Zeit der Erstellung korrekt waren oder aus vermeintlich zuverlässigen Quellen stammen. Es obliegt jedoch dem Benutzer, andere angemessene Informationsquellen zu prüfen und zu verstehen, alle Gesetze und Verfahren zu befolgen, die für den sicheren Umgang und die sichere Benutzung des Produktes gelten und die Eignung des Produktes für den geplanten Einsatz zu bestimmen.

Stand: 08/2006

Am Ostal 21/22  
70327 Stuttgart  
Germany  
Telefon: +49 (0) 711 - 3 89 86 00  
Telefax: +49 (0) 711 - 3 89 86 011  
www.hexionchem.com

**HEXION™**

Specialty Chemicals

## Technische Information

Epoxy and Phenolic Resins Division  
Epoxy Resins

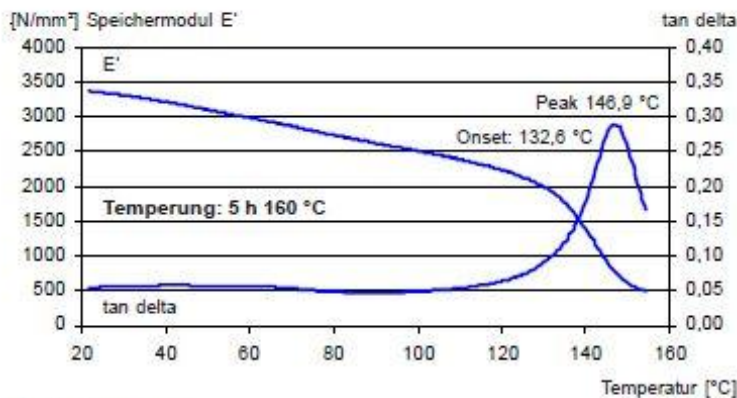
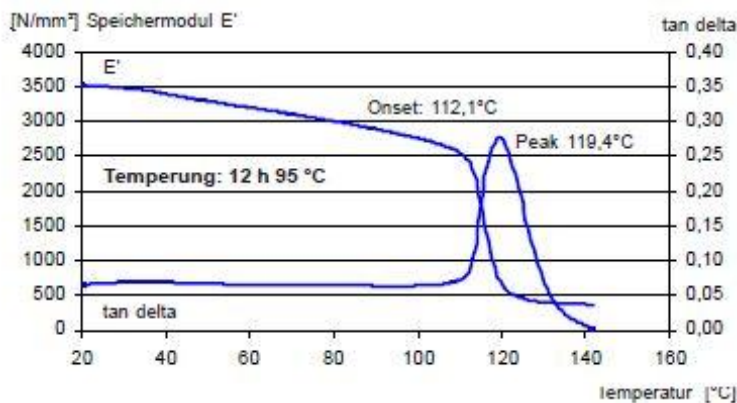
2.2 - 26

## Infusionsharz MGS® RIM 935

Max. $T_g$ bei 80 °C Temperung	90-100 °C
Max. $T_g$ bei 95 °C Temperung	105-120 °C
Max. $T_g$ bei 160 °C Temperung	135-150 °C

**Glasübergangs-  
temperatur ( $T_g$ )  
unkonditioniert**DMA -  $T_g$  (peak) tan delta Infusionsharz RIM 935 mit Härter RIMH 937  
Messung nach Temperung

## DMA



## Messbedingungen

Probe: RIM 935/RIMH 937

Dicke: 2 mm

Frequenz: 1 Hz

Heizrate: 2 K/min

HEXION SPECIALTY CHEMICALS übernimmt keine Garantie, weder ausdrücklich noch stillschweigend, für ein Produkt oder dessen Marktängigkeit oder Tauglichkeit für einen beliebigen Zweck oder für die Richtigkeit der von HEXION SPECIALTY CHEMICALS bereitgestellten Informationen, sondern das Unternehmen garantiert lediglich, dass das Produkt den vertraglichen Spezifikationen entspricht und kein in den Vereinigten Staaten gültiges Patent verletzt. HEXION SPECIALTY CHEMICALS hat vorausgesetzt, dass die hier angegebenen Informationen zur Zeit der Erstellung korrekt waren oder aus vermeintlich zuverlässigen Quellen stammen. Es obliegt jedoch dem Benutzer, andere angemessene Informationsquellen zu prüfen und zu verstehen, alle Gesetze und Verfahren zu befolgen, die für den sicheren Umgang und die sichere Benutzung des Produktes gelten und die Eignung des Produktes für den geplanten Einsatz zu bestimmen.

Stand: 08/2006

Am Ostal 21/22  
70327 Stuttgart  
Germany  
Telefon: +49 (0) 711 - 3 89 90 00  
Telefax: +49 (0) 711 - 3 89 90 011  
www.hexionchem.com



# Anlagen, Hostaphan® RNK

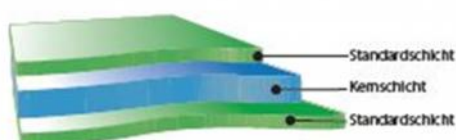


## Hostaphan® RNK

### Hochglänzende, transparente Polyesterfolie

Hostaphan® RNK ist eine hochtransparente, biaxial orientierte, coextrudierte Folie aus Polyethylenterephthalat (PET).

### Schichtaufbau Hostaphan® RNK



### Typische Werte

Eigenschaften	Dicke µm	Einheiten	Werte		Prüfmethoden	Prüfbedingungen
			längs	quer		
MECHANISCH						
Zugfestigkeit	12-30 36 50-75	N/mm²	260 260 185	260 280 270	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw.100%/min.; 23 °C, 50 % r.F.
Reißdehnung	12-23 30-36 50-75	%	120 140 200	120 125 120	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw.100%/min.; 23 °C, 50 % r.F.
Elastizitätsmodul	12-23 30-36 50-75	N/mm²	4500 4500 4000	5000 5000 5500	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw. 1 %/min.; 23 °C, 50 % r.F.
Zugspannung zur Erzeugung einer Dehnung von 5% (F5-Wert)	12-75	N/mm²	110	105	ISO 527-1 und ISO 527-3 Probekörper Typ 2	Prüfgeschw.100%/min.; 23 °C, 50 % r.F.
THERMISCH						
Schrumpf	12-23 30-75	%	1,5 1,0	0,2 0,1	DIN 40634	150°C, 15 min.
OPTISCH						
Transparenz	12-75	%	90		ASTM-D 1003-61 Methode A	-
Trübung	12-23 30-36 50-75	%	2 2,7 3,5		ASTM-D 1003-61 Methode A	Erweiterter Meßwinkel
OBERFLÄCHE						
Reibungskoeffizient (statisch)	12-75	-	0,4		DIN53375 oder ASTM-D 1894	-



Kasteler Str. 45 • 65203 Wiesbaden/Deutschland • Tel.: +49 611 96203 • Fax.: +49 611 9629357



Eigenschaften	Dicke µm	Einheiten	Werte		Prüfmethoden	Prüfbedingungen
			längs	quer		
Oberflächen- spannung	12-75	mN/m (dyne/cm)	43		DIN 53364	Testtinten
PHYSIKALISCH/CHEMISCH						
Dichte	12-75	g/cm³	1,4		ASTM-D 1505-68 Methode C	23°C
Leitfähigkeit des wässrigen Aus- zugs	12-75	µS/cm	2,0		DIN 40634 oder VDE 0345	1kHz
Wasseraufnahme (gegenüber Trockenzustand)	12-75	%	0,5		ASTM-D 570	4 Tage in Wasser bei 23°C
ELEKTRISCH						
Durchschlag- spannung	12 19 23 30 36 50 75	kV	4,5) 6,5 7,5 9 10 12 16		DIN 40634 oder VDE 0345 in Luft	23°C, 50 Hz,
Dielektrischer Verlustfaktor (tanδ)	12-75	-	0,0020 0,0052 0,0210 0,0060 0,0060 0,0048		DIN 40634 oder VDE 0345	23°C, 50 Hz 23°C, 1 kHz 23°C, 1 MHz 23°C, 240 MHz 23°C, 9300 MHz 150°C, 50 Hz
Spezifischer Durchgangs- widerstand	12-75	Ω x cm	> 10 <sup>17</sup> > 10 <sup>11</sup>		DIN 40634 oder VDE 0345	23°C, DC 150°C, DC
Oberflächen- widerstand	12-75	Ω	> 5 x 10 <sup>14</sup> > 5 x 10 <sup>14</sup> > 10 <sup>11</sup>		DIN 53482 oder VDE 0303/Teil 3	23°C, 25% r.F. 23°C, 50% r.F. 150°C, 75% r.F.
Dielektrizitäts- zahl	12-75	-	3,3 3,3 3,2 2,9 2,9 3,6		DIN 40634 oder VDE 0345 in der Luft	23°C, 50 Hz 23°C, 1 kHz 23°C, 1 MHz 23°C, 240 MHz 23°C, 9300 MHz 150°C, 50 Hz
BARRIERE						
Luft	12	cm³/m² x d x bar	60		DIN 53380	23°C, 0% r.F.
Sauerstoff	12	cm³/m² x d x bar	110		DIN 53380	23°C, 50% r.F.
Wasserdampf	12	g/m² x d	16		DIN 53122	23°C, 85% r.F.
Stickstoff	12	cm³/m² x d x bar	35		DIN 53380	23°C, 0% r.F.
Kohlendioxid	12	cm³/m² x d x bar	500		DIN 53380	23°C, 0% r.F.



Hostaphan® RNK eignet sich hervorragend für eine Vielzahl von industriellen Anwendungen und Anwendungen im Verpackungsbereich.

Hostaphan® RNK ist in den Dicken von 12-23 µm auch mit einer einseitigen Corona-Behandlung lieferbar als Hostaphan® RNK C sowie chemisch vorbehandelt zur Verbesserung der Haftung von aufgedampften Metallschichten, Druckfarben oder Beschichtungen. Nähere Informationen entnehmen Sie bitte unseren Datenblättern zu Hostaphan® RNK C, RNK 2600, RNK 260 C, RNK 2CSR und RNK 2DEF.

### Lieferprogramm Hostaphan® RNK

Dicke µm	Ausbeute		Rollenlänge m	Rollen- durchmesser mm	Rollenlänge m	Rollen- durchmesser mm
	g/m²	m²/kg				
12	17	60	24 000	650	48 000	900
15	21	48	11 200	490	33 600	830
19	27	38	9 200	500	18 400	700
23	32	31	9 600	550	19 200	800
30	42	24	9 360	630	15 600	800
36	50	20	8 000	635	12 000	770
50	70	14	6 400	670	9 600	810
75	110	9.6	4 000	650	6 000	790

Andere Rollenlängen auf Anfrage! Kerndurchmesser: 152,4 mm (6")

Diese Hostaphan® Folie ist entsprechend der aktuellen Fassung der EU-Verordnungen 1935/2004 und 10/2011 sowie den Anforderungen der FDA gemäß 21 CFR 177.1630 unter den Bedingungen, die in unserer aktuellen Konformitätserklärung beschrieben sind, lebensmittelrechtlich zugelassen. Vor der Verwendung von dieser Hostaphan® Folie als Bedarfsgegenstand in Lebensmittelkontakt ist die Konformitätserklärung anzufordern.

Diese Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse und sollten über unsere Produkte und deren Anwendungsmöglichkeiten informieren. Die aufgeführten Werte geben typische Merkmale der Folie wieder. Sie stellen keine Grenzwerte einer Spezifikation dar. Sie haben somit nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften der Produkte oder deren Eignung für einen konkreten Einsatzzweck zuzusichern. Etwa bestehende gewerbliche Schutzrechte sind zu berücksichtigen. Eine einwandfreie Qualität gewährleisten wir im Rahmen der Allgemeinen Geschäftsbedingungen der MITSUBISHI POLYESTER FILM GmbH.

Edition 08/16



Kasteler Str. 45 • 65203 Wiesbaden/Deutschland • Tel.: +49 611 96203 • Fax.: +49 611 9629357

# Anlagen, Datenblatt Kraibon®

Ideas and solutions in rubber compounding



## KRAIBON® TECHNISCHES DATENBLATT TECHNICAL DATA SHEET

Mischung	Compound:	AA9KFZ (formerly SAA9579/78)			
Spezifikation:	Specification:	Keine / none			
Vulkanisationsbed.	Vulcanisation Conditions	Probekörper	Ring R1	10 Min / min	140 °C
		Test specimen	Stab S2 Dumbbell	10 Min / min	140 °C
Temperbedingungen	Post Curing Conditions			0 Std. / h	°C
Prüfmerkmale	Properties		Einheiten Units	Soll – Werte Desired val.	Ist – Werte Actual value
Reißfestigkeit (S2)	Tensile Strength (S2)	DIN 53504	MPa		11,1
Reißdehnung (S2)	Elongation at break (S2)	DIN 53504	%		129
Spannungswert 50%	Modulus 50% (S2)	DIN 53504	MPa		4,9
Spannungswert 100%	Modulus 100% (S2)	DIN 53504	MPa		8,4
Härte (R1)	Hardness (R1)	DIN ISO 7619-1	Shore A		89
Rückprallelastizität	Rebound Resilience (R1)	DIN 53512	%		54
Weiterreißwiderstand	Tear strength (S2)	DIN ISO 34-1	N/mm		3,0
Dichte (R1)	Specific Gravity (R1)	DIN EN ISO 1183-1	kg /dm³		1,09
Druckverformungsrest	Compression Set	22 h 70°C DIN ISO 815	%		17

Datum Date: 10.11.2015

Unterschrift Sign: Jens Schaub

Unsere Prüfberichte beruhen auf Messungen an Stichproben und stellen nur eine technische Beschreibung unserer Produkte dar. Sie entbinden nicht von der Prüfung der Ware für Ihre Zwecke und Verfahren.

Our test reports base on random measurements and are meant to be nothing but a technical description of our products. They do not release from checking the goods for own purpose and procedures.



Gummiwerk KRAIBURG  
GmbH & Co. KG  
Teplitzer Str. 20  
84478 Waldkraiburg / Germany

Fon + 49 (0) 8638 / 61- 0  
Fax + 49 (0) 8638 / 61- 310  
info@kraiburg.de  
<http://www.kraiburg-composites.com/>

Handelsregister Traunstein HRA 8626  
PhG.: Gummiwerk KRAIBURG Verwaltungs GmbH  
Handelsregister Traunstein HRB 16108  
Sitz Waldkraiburg, GF: Helmut Esefeld



# Anlagen, Verarbeitung Kraibon®

Ideas and solutions in rubber compounding



## Verarbeitungshinweise KRAIBON® AA9KFZ

### Eigenschaften:

kalandrierte Elastomerfolie auf EPDM-Basis für den Direktverbund.  
Haftung zu Epoxy-Prepregs, andere Matrixsysteme auf Anfrage.

### Anwendung:

Standardmaterial – Impactverbesserung, Haptik, Splitterschutz und Gelenk

### Verarbeitungshinweise:

#### a) Konfektion

Schneiden: KRAIBON® kann mit einem Cutter geschnitten werden.

Drapierung: Es kann wie Prepreg eingelegt, aufgedoppelt und drapiert werden.

Während der Fließzeit ( $t_{10}$ ) fließt das Material unter dem Außendruck in die gewünschte Form und kann dabei auch komplexe Konturen abformen. Deshalb muss die Elastomerfolie nur grob konfektioniert werden. Die Formbarkeit bzw. der Tack lässt sich durch Erwärmen (nicht über 100°C) mittels eines Heißluftgebläses erhöhen.

#### b) Härtung

### Vulkanisationsbedingungen / Härtezeiten der Mischung AA9KFZ

Temperatur [°C]	min. Druck absolut [bar]	Verarbeitungszeit oder Fließzeit $t_{10}$ [min]	Aushärtezeit $t_{90}$ [min]
110	1,4	9,0	240
120	2,0	4,2	64
130	2,7	3,3	25
140	3,6	0,8	7,4
150	4,8	0,4	3,3

Die angegebenen Härtezeiten sind Mindestangaben. Längere Härtezyklen sind bis etwa zum fünffachen der angegebenen Aushärtezeit unkritisch.

Der Zutritt von Luftsauerstoff während der Härtung inhibiert die Vernetzung und führt zu einer untervernetzten und klebrigen Oberfläche.

Um Porosität im Elastomer zu vermeiden sollte, nach bisheriger Erfahrung, der in der Tabelle angegebene minimale Gesamtdruck eingehalten werden. Dabei sind der Druck im Vakuumsack und der äußere Druck, z.B. durch Autoklaven, zu addieren.

### Lagerung:

Wir garantieren bei einer Lagerung gem. DIN7716 eine Haltbarkeit von 6 Monaten.

Bitte die Rolle möglichst hängend lagern, um Druckstellen oder ein erschwertes Lösen von der Folie zu vermeiden. Das Einfrieren des Materials verlängert die Haltbarkeit. Beim Auftauen muss das Eindringen von Kondenswasser verhindert werden.

Stand 05/2015

# Anlagen, Datenblatt DuoMod® DP5045



DuoMod® DP5045

Product Specification

Date Issued: 07/20/15

Supersedes: 03/23/12

**Description:** DuoMod products improve fracture toughness and compression after impact in epoxy composites and adhesives. A carboxyl functional elastomer in powder form, DuoMod DP5045 is designed for direct addition to resin systems without the need for solvents. It is especially useful in high-performance composites for sporting goods, aerospace, automotive and construction applications. Unlike other modifiers, DuoMod DP5045 does not detract from critical mechanical properties under ambient or hot/wet conditions.

**Packaging:** DuoMod DP5045 shall be in the form of 15 lb boxes free from foreign matter considered objectionable for normal applications.

Specification	Min.	Max.	Target	Zeon Test Procedure No.
<b>Polymer Properties</b>				
Heat Loss (%)	0	2.0	1.0	1339
Ash (%)	16.0	24.0	20	873
<i>For Information Purposes Only</i>				
Average Particle Size (microns)	20	80	50	1372
T-100 (%)	TBD <sup>(1)</sup>	TBD	99	1372
T-270 (%)	TBD	TBD	66	1372
R-100 + R-140	TBD	TBD	4	1372

**Special Notes:**

Refer to appropriate SDS for proper safety, handling and storage instructions.

Recertification: check product form at 6 months; check polymer properties at 2 years.

Zeon Chemicals only guarantees that DuoMod products are hand friable and not free-flowing.

To prevent premature agglomeration:

1. Store below 75°F in low-humidity areas.
2. Use the first in-first out inventory system.
3. Order no more than three- or four-month supply, particularly in the summer.

<sup>(1)</sup> To Be Determined when sufficient quality data is available.

**Reason for Issue:** 1) Update polymer property specification  
2) Revise recertification information

Zeon Chemicals L.P. 4111 Bells Lane, Louisville, KY 40211 • Phone: 877-ASK-ZEON • Fax: 502-775-2055

The information contained herein is believed to be reliable, but no representations, guarantees or warranties of any kind are made as to its accuracy, suitability for particular applications or the results to be obtained therefrom. The information is based on laboratory work with small-scale equipment and does not necessarily indicate end product performance. Because of the variations in methods, conditions and equipment used commercially in processing these materials, no warranties or guarantees are made as to the suitability of the products for the applications disclosed. Full-scale testing and end product performance are the responsibility of the user. Zeon Chemicals L.P. shall not be liable for and the customer assumes all risk and liability of any use or handling of any material beyond the direct control of Zeon Chemicals L.P. The SELLER MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Nothing contained herein is to be considered as permission, recommendation, nor as an inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.



# Anlagen, DuoMod® DP5045 Präsentation



## Epoxy Resin Modification for Carbon Fiber

201NBR5B0XX

Zeon Chemicals L.P. May 2011

DuoMod® 5045 is pre-crosslinked & carboxyl functional ultra fine NBR powder designed specifically for the modification of epoxy based resins used in carbon fiber prepreg. This uniquely designed product provides large increases in interlaminar fracture toughness when compared with unmodified prepreg. DuoMod 5045 can also be used to modify epoxy resins used in the RTM and VARTM processes. DuoMod has been found to overcome many of the shortcomings of conventional epoxy tougheners at loading levels less than 4%.

### DuoMod vs. Conventional Epoxy Modifiers

Conventional liquid or solid elastomers and or thermoplastic elastomers have been used to toughen brittle epoxy resin matrices and are typically incorporated via solvation processes or even phase separation during the cure cycle. While providing improved toughness, these methods of incorporating conventional modifiers often adversely affect interlaminar tack, decrease hot fracture toughness and alter glass transition temperature of the total laminar composite. Due to its carboxyl functionality and ultra fine powder form, DuoMod 5045 consistently incorporates itself into the epoxy resin, without the use of solvents, to provide improved laminar tack, significantly increased interlaminar toughness and improved thermal stability.

### Improved Fracture Toughness

Toughener	Toughener Wt. %	G <sub>IC</sub> J/m <sup>2</sup>	G <sub>2C</sub> J/m <sup>2</sup>	Tg * deg. C	Hot/Wet Tg ** deg. C
A. Control	0	469	717	139	123
B. DuoMod® 5045	2	655	1188	133	117
C. DuoMod® 5045	4	754	1262	131	111

Notes \* Tg was determined by the peak in loss modulus from 5C/min. ramp rate.

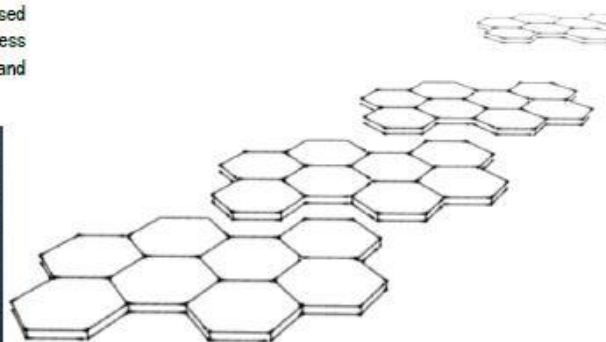
\*\* Conditioned in 71C deionized water for 48 hours.

#### Test Formulation

	A	B	C
Epon® 828 Epoxy Resin	26.0	26.0	26.0
Epon® 836 Epoxy Resin	74.0	74.0	74.0
DuoMod® DP5045	0.0	6.9	13.8
Triphenyl Phosphine	0.22	0.22	0.22
Dicyandiamine	6.7	6.7	6.7
Diuron	3.7	3.7	3.7
<b>TOTALS</b>	<b>110.62</b>	<b>117.52</b>	<b>124.42</b>

### Typical Applications

From sporting equipment and wind energy to the most demanding aerospace applications, DuoMod 5045 can be used at low loading levels to provide significant toughness improvements to most composite resin systems and manufacturing processes.



The information herein is believed to be reliable, but no representations, guarantees or warranties of any kind are made as to its accuracy, suitability for particular applications or the results to be obtained therefrom. The information is based on laboratory work with small-scale equipment and does not necessarily indicate end-product performance. Because of the variation in methods, conditions and equipment used commercially in processing these materials, no warranties or guarantees are made as to the suitability of the products for the applications disclosed. Full-scale testing and end-equipment performance are the responsibility of the user. Zeon Chemicals L.P. shall not be liable for and the customer assumes all risk and liability of any use or handling of any material beyond the direct control of Zeon Chemicals L.P. The SELLER MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Nothing contained herein is to be considered permission, recommendation, or as an inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.



ZEON CHEMICALS

# Anlagen DuoMod® DP5045 Verarbeitung

## *DuoMod*® Mixing Procedure for *DuoMod*® DP5045

### Ambient Temperature Process:

1. Add 5-7 parts by weight DuoMod slowly to 100 parts epoxy resin under low shear mixing.
2. Mix for 5 minutes under low shear to disperse the DuoMod particles. A propeller-type mixing blade is acceptable.
3. Add 0.25 parts by weight triphenylphosphine (C.A.S. No. 603-35-0).
4. Mix under low shear for six hours at room temperature to achieve complete reaction between the DuoMod particles and epoxy resin.
5. Follow your standard epoxy processing procedure.

### Elevated Temperature Process:

1. Add 5-7 parts by weight DuoMod slowly to 100 parts epoxy resin under low shear mixing.
2. Mix for 5 minutes under low shear to disperse the DuoMod particles. A propeller-type mixing blade is acceptable.
3. Add 0.25 parts by weight triphenylphosphine (C.A.S. No. 603-35-0) and heat to 140°C.
4. Mix under low shear for 30 minutes at 140°C to achieve complete reaction between the DuoMod particles and epoxy resin.
5. Cool resin to room temperature (below 30°C) and follow your standard epoxy processing procedure.



Zeon Chemicals L.P. 4111 Bells Lane Louisville, KY 40211 USA Phone: 877-ASK ZEON 502-775-2000 Fax: 502-775-2025 [www.zeonchemicals.com](http://www.zeonchemicals.com)

The information contained herein is believed to be reliable, but no representations, guarantees or warranties of any kind are made as to its accuracy, suitability for particular applications or the results to be obtained therefrom. The information is based on laboratory work with small-scale equipment and does not necessarily indicate end product performance. Because of the variations in methods, conditions and equipment used commercially in processing these materials, no warranties or guarantees are made as to the suitability of the products for the applications disclosed. Full-scale testing and end product performance are the responsibility of the user. Zeon Chemicals L.P. shall not be liable for and the customer assumes all risk and liability of any use or handling of any material beyond the direct control of Zeon Chemicals L.P. THE SELLER MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OR MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Nothing contained herein is to be considered as permission, recommendation, nor as an inducement to practice any patented invention without permission of the patent owner.





# **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Colditz, den 23.06.2017

Markus Kurpjuwait